

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

RAFAEL DOMINGUES

BALANÇO HÍDRICO E CATIÔNICO NO SOLO SOB CULTIVO DE SOJA, CEVADA
E MILHO EM AMBIENTE PROTEGIDO

PONTA GROSSA
2024

RAFAEL DOMINGUES

BALANÇO HÍDRICO E CATIÔNICO NO SOLO SOB CULTIVO DE SOJA, CEVADA
E MILHO EM AMBIENTE PROTEGIDO

Tese apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de Concentração: Agricultura. Linha Pesquisa: Fisiologia, Melhoramento e Manejo de Culturas.

Orientador: Prof. Dr. André Belmont Pereira
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

PONTA GROSSA
2024

D671 Domingues, Rafael
Balanço hídrico e catiônico no solo sob cultivo de soja, cevada e milho em ambiente protegido / Rafael Domingues. Ponta Grossa, 2024.
196 f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. André Belmont Pereira.
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires.

1. Glycine max (L.) Merrill. 2. Hordeum vulgare (L.). 3. Zea mays (L.). 4. Solo - Umidade. 5. Relação Ca:Mg. I. Pereira, André Belmont. II. Caires, Eduardo Fávero. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Agricultura. IV.T.

CDD: 633



FICHA DE APROVAÇÃO

RAFAEL DOMINGUES

BALANÇO HÍDRICO E CATIÔNICO NO SOLO SOB CULTIVO DE SOJA, CEVADA E MILHO EM AMBIENTE PROTEGIDO.

Tese apresentada para obtenção do título de doutor em Agronomia na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Agricultura.

Ponta Grossa, 21 de outubro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE BELMONT PEREIRA**
Data: 25/10/2024 16:56:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Belmont Pereira - Orientador
Doutor em Agronomia

Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 **JOSE RAULINDO GARDINGO**
Data: 01/11/2024 09:02:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Raulindo Gardingo
Doutor em Agronomia
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS VINICIUS RIBAS MILLEO**
Data: 12/11/2024 17:47:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Vinícius Ribas Milléo
Doutor em Agronomia
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON GALVANI**
Data: 28/10/2024 13:39:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson Galvani
Doutor em Agronomia
Universidade de São Paulo/USP

Documento assinado digitalmente
 **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**
Data: 28/10/2024 09:48:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jarbas Honório Miranda
Doutor em Irrigação e Drenagem
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

Ponta Grossa, 21 de outubro de 2024.

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

Dedico o trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção e ânimo em seguir em frente. Pela força espiritual para a realização deste trabalho.

À família pelo apoio e incentivo na vida acadêmica.

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

À Capes pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Laboratório de Fertilidade do Solo pelo auxílio nas análises química do solo e análise nutricional de plantas.

À oportunidade de exercer a função de bolsista técnico pelo C-Labmu/CTAGRO e a Fundação Araucária pela concessão de bolsa.

Ao professor Dr. André Belmont Pereira pela paciência na orientação e pelos ensinamentos, apoio e incentivo durante a condução deste trabalho que foram importantes para a realização deste estudo.

Ao professor Dr. Eduardo Fávero Caires pela paciência na orientação e pelos ensinamentos, apoio e incentivo durante a condução deste trabalho que foram importantes para a realização deste estudo.

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

Aos demais professores da pós-graduação, que foram tão importantes no meio acadêmico pelas lições e ensinamentos dados.

Aos alunos Makissuel Borgo, Gabriel Vaz Pezzini, Haroldo Bernardo de Geus, Felipe Haroldo Lucchesi de Geus e André Henrique Sipkes pelo auxílio concedido durante a condução do experimento.

Aos demais colegas e amigos que auxiliaram durante a realização deste trabalho.

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

(Aristóteles)

RESUMO

DOMINGUES, R. **Balanço hídrico e catiônico no solo sob cultivo de soja, cevada e milho em ambiente protegido**. Orientador: André Belmont Pereira. Coorientador: Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2024. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2024.

O controle da água no sistema solo-planta-atmosfera é importante para assegurar a maximização da produção agrícola. A absorção de nutrientes pelas plantas é influenciada pela umidade do solo, pois os nutrientes chegam até as raízes por fluxo de massa e/ou difusão. O balanço catiônico no solo constitui fator de grande influência na absorção de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). Sob a hipótese de que a relação Ca:Mg mais adequada para as plantas depende do nível de água no solo, o presente trabalho teve o objetivo de estudar as inter-relações entre suprimento de água e balanço catiônico no solo nas respostas biológicas de plantas de soja, cevada e milho em ambiente protegido. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso no esquema fatorial 4×4 , com três repetições. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis de água definidos a partir do cálculo da evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) e suas frações (60, 80, 100 e 120%), e quatro relações Ca:Mg no solo (1:1, 3:1, 6:1 e 9:1). No caso da soja, foram utilizados dois cultivares, IAC Foscarin-31 (convencional) e BMX Zeus IPRO (transgênico). Os resultados obtidos com a soja mostraram que os parâmetros biométricos e os componentes de rendimento do cultivar IAC Foscarin-31 foram afetados pelo status de água no solo e pelo balanço catiônico. Para o cultivar BMX Zeus IPRO, a maioria das variáveis fitotécnicas aumentou linearmente em função dos níveis de água no solo. Na cevada, o incremento dos parâmetros biológicos foi linear em função do suprimento hídrico do solo. Para o milho, os parâmetros fitotécnicos e as variáveis fisiológicas foram condicionados pelo status de água no solo. Os estádios fenológicos do milho condicionaram a expressão dos parâmetros ecofisiológicos. A extração de Ca pelas plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31, e de milho foi condicionada pelos regimes hídricos do solo e pelas relações Ca:Mg no solo. Para a cevada e o cultivar de soja BMX Zeus IPRO, a absorção de Ca aumentou linearmente com o incremento da disponibilidade hídrica no solo. A extração de Mg pelas plantas de soja e milho foi afetada positivamente pelos níveis de água no solo. A absorção de Mg pelas plantas de cevada foi condicionada pelo status de água e pelo balanço catiônico no solo. A extração de K pelas plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31, foi governada pelos fatores status de água no solo e balanço de cátions. A absorção de K pelas plantas de cevada e o cultivar de soja BMX Zeus IPRO aumentou linearmente com o incremento dos níveis de água no solo. O balanço catiônico no solo não exerceu influência sobre as respostas ecofisiológicas do milho e, nem tampouco, sobre o desempenho fitotécnico de soja, cevada e milho, ao passo que essas variáveis-resposta foram explicadas pela disponibilidade hídrica no solo. A relação Ca:Mg no solo mais adequada para obtenção da melhor resposta biológica não foi dependente do suprimento hídrico no solo.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill; *Hordeum vulgare* (L.); *Zea mays* (L.); umidade do solo; relação Ca:Mg.

ABSTRACT

DOMINGUES, R. **Water status and soil cationic balance for soybean, barley, and corn cropping systems under protected environment.** Advisor: André Belmont Pereira. Co-advisor: Eduardo Fávero Caires. Ponta Grossa, 2024. Thesis (Doctoral in Agronomy) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2024.

Water control in the plant-soil system comes to being of a great importance to assure maximum crop yields at a commercial scale. Uptake of nutrients by the plants is impinged upon soil water status, because macronutrients reach the roots by means of mass flux and diffusion processes. Soil cationic balance turns out to be a pivotal factor conditioning uptake of calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K). In light of the hypothesis of Ca:Mg ratio at suitable levels hinging upon soil water supply, the current research thesis aimed to scrutinize the inter-relationships between soil water supply and soil cationic balance on biological responses of soybean, barley and corn plants grown under protected environmental conditions. The statistical design was a randomized block in a factorial scheme 4 x 4 with three replications. The treatments imposed in the study at issue were comprised by four soil water supply levels as a function of fractions of crop maximum evapotranspiration (60, 80, 100, and 120% ET_m) plus four soil Ca:Mg ratios (1:1, 3:1, 6:1, and 9:1). For soybean crop, two cultivars were used: IAC Foscarin-31 (conventional) and BMX Zeus IPRO (transgenic). The results obtained from the soybean crop have shown that biometric parameters along with yield components of soybean IAC Foscarin-31 cultivar were affected by either soil water status or soil cationic balance. For BMX Zeus IPRO cultivar, the majority of agronomical variables linearly escalated as a function of soil water status. For barley crop, the increment of biological parameters was linear as a function of soil water supply. For corn crop, agronomical performance and ecophysiological variables were affected by soil water status. Corn growth stages conditioned the expression of corn ecophysiological parameters. Calcium extraction by the soybean plants, IAC Foscarin-31 cultivar, plus corn crop was influenced by soil water regimes along with soil Ca:Mg ratios. For barley and BMX Zeus IPRO soybean cultivar, calcium uptake linearly increased with augments in soil water availability. Magnesium extraction by both soybean and corn plants was positively affected by soil water levels. Magnesium uptake by the barley plants was conditioned by soil water status and soil cationic balance. Potassium extracted by the soybean plants, IAC Foscarin-31 cultivar, was governed by soil water status and cation balance factors. Potassium uptake by the barley and soybean plants belonging to BMX Zeus IPRO linearly increased with increments in soil water levels. Soil cationic balance did not exert any influence on corn ecophysiological responses, as well as on the agronomical performance of soybean, barley and corn crops, whilst such response variables were explained by the soil water availability. The soil Ca:Mg ratio most suitable for obtaining the best possible biological response did not depend on soil water supply conditions under protected environment.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill; *Hordeum vulgare* (L.); *Zea mays* (L.); soil moisture; Ca:Mg ratio.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Visualização das plantas de soja, de cevada e de milho cultivadas em vasos em ambiente protegido durante as safras 2022/2023. Ponta Grossa – PR, 2024.....49
- Figura 2 – Sequenciamento dos valores normais da temperatura média e da precipitação no município de Ponta Grossa. Ponta Grossa – PR, 2024.50
- Figura 3 – Valores médios diários das taxas de evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de soja cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.64
- Figura 4 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de soja cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.65
- Figura 5 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento de dois cultivares de soja em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.67
- Figura 6 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura da soja sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.68
- Figura 7 – Consumo hídrico ideal diário (ET_m) dos cultivares IAC Foscari-31 e BMX Zeus IPRO desde o desenvolvimento vegetativo até a maturação das plantas de soja em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.68
- Figura 8 – Variação do consumo hídrico relativo (K_c) entre a semeadura, a germinação e a emergência de dois genótipos de soja cultivados em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.69
- Figura 9 – Variação do consumo hídrico relativo (K_c) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo e formação da produção de dois genótipos de soja cultivados em ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.....70
- Figura 10 – Altura de plantas de soja do cultivar IAC Foscari-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$71
- Figura 11 – Altura de plantas de soja do cultivar IAC Foscari-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$72
- Figura 12 – Altura de plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO, em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$73

Figura 13 – Número total de nós de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de status de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	76
Figura 14 – Número de nós viáveis de plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$	76
Figura 15 – Número total de nós e número de nós viáveis de plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função de suprimento de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	77
Figura 16 – Número de vagens por planta total e viáveis de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de suprimento de água no solo para cada relação Ca:Mg no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. NT: Número de vagens total. NV: Número de vagens viáveis. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	79
Figura 17 – Número de vagens por planta total e viáveis de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de suprimento de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. NT: Número de vagens total. NV: Número de vagens viáveis. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	80
Figura 18 – Número de vagens por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	81
Figura 19 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	83
Figura 20 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	83
Figura 21 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo para relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	85
Figura 22 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	85
Figura 23 – Número de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	86
Figura 24 – Número de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	87

Figura 25 – Número de grãos por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	88
Figura 26 – Massa de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	89
Figura 27 – Massa de grãos planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$	90
Figura 28 – Massa de grãos por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	91
Figura 29 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	95
Figura 30 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	96
Figura 31 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	97
Figura 32 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	97
Figura 33 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	98
Figura 34 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	99
Figura 35 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$	100
Figura 36 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$	101
Figura 37 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	102

Figura 38 – Extração de Mg pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	103
Figura 39 – Extração de Mg pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	104
Figura 40 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$.	105
Figura 41 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$.	106
Figura 42 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	107
Figura 43 – Regime de temperatura do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento da cevada. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.	108
Figura 44 – Valores médios diários das taxas de evapotranspiração de referência (ET _o) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de cevada cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.	108
Figura 45 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de cevada cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.	109
Figura 46 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento da cultura de cevada em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.	110
Figura 47 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura da cevada sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	111
Figura 48 – Consumo hídrico ideal diário (ET _m) da cultura da cevada desde o desenvolvimento vegetativo até a maturação das plantas em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	112
Figura 49 – Variação do consumo hídrico relativo (K _c) entre a semeadura, a germinação e a emergência da cevada cultivada em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	113
Figura 50 – Variação do consumo hídrico relativo (K _c) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo e formação da produção da cevada cultivada em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	113

Figura 51 – Altura de plantas de cevada em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$.	115
Figura 52 – Altura de plantas de cevada em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$.	117
Figura 53 – Número de perfilhos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	117
Figura 54 – Número de espigas por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	119
Figura 55 – Número de grãos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	121
Figura 56 – Massa de grãos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	122
Figura 57 – Massa de mil grãos de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$.	123
Figura 58 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	125
Figura 59 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de cevada em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	126
Figura 60 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de cevada em função das relações Ca:Mg no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	127
Figura 61 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	128
Figura 62 – Extração de Ca pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	129
Figura 63 – Extração de Mg pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$.	130
Figura 64 – Extração de Mg pelas plantas de cevada em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	130
Figura 65 – Extração de K pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$.	131

Figura 66 – Regime de temperatura do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento do milho. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.....	132
Figura 67 – Regime de umidade relativa do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento do milho. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.....	133
Figura 68 – Valores médios diário das taxas de evapotranspiração de referência (ET _o) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de milho cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.	133
Figura 69 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de milho cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.	135
Figura 70 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento da cultura de milho em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.	136
Figura 71 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura do milho sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	137
Figura 72 – Consumo hídrico ideal diário (ET _m) da cultura do milho desde o desenvolvimento vegetativo até início do período reprodutivo das plantas em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	138
Figura 73 – Variação do consumo hídrico relativo (K _c) entre a semeadura, a germinação e a emergência do milho cultivado em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	138
Figura 74 – Variação do consumo hídrico relativo (K _c) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo do milho cultivado em ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.	139
Figura 75 – Altura de plantas de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	140
Figura 76 – Massa fresca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	142
Figura 77 – Massa seca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	143
Figura 78 – Porcentagem de massa seca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$	145

Figura 79 – Massa seca de raiz de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	146
Figura 80 – Fotossíntese líquida de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$	150
Figura 81 – Fotossíntese líquida de plantas de milho em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condições climáticas de ambiente protegido aos 69 DAE. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	150
Figura 82 – Fotossíntese líquida de plantas de milho em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido aos 69 DAE. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$	151
Figura 83 – Condutância estomática de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	153
Figura 84 – Concentração de carbono intercelular de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	155
Figura 85 – Transpiração foliar de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	156
Figura 86 – Eficiência de carboxilação de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$	159
Figura 87 – Fotossíntese líquida de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	161
Figura 88 – Condutância estomática de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	162
Figura 89 – Concentração de carbono intercelular de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	163
Figura 90 – Transpiração foliar de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	163
Figura 91 – Eficiência fotossintética do uso da água de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa	

– PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	164
Figura 92 – Eficiência de carboxilação de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).	165
Figura 93 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	167
Figura 94 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	168
Figura 95 – Teores de K trocável no solo após o cultivo do milho em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	169
Figura 96 – Teores de K trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P<0,01$	169
Figura 97 – Extração de Ca pelas plantas de milho em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	171
Figura 98 – Extração de Ca pelas plantas de milho em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$ e **: $P<0,01$	172
Figura 99 – Extração de Mg pelas plantas de milho em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P<0,05$	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de soja sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	51
Tabela 2 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	52
Tabela 3 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	52
Tabela 4 – Esquema da análise de variância com aplicação de teste F para as variáveis avaliadas nos experimentos de soja, cevada e milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	63
Tabela 5 – Esquema da análise de variância com aplicação de teste F para as variáveis avaliadas na cultura do milho em função de status de água no solo e estágio fenológico sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	63
Tabela 6 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para altura de plantas, altura de inserção de primeira vagem, número total de nós e número de nós viáveis em população de plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	71
Tabela 7 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para altura de plantas, altura de inserção de primeira vagem, número total de nós e número de nós viáveis em população de plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	72
Tabela 8 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para número de vagens por planta (NVP) total e viáveis, número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de plantas do cultivar de soja IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	78
Tabela 9 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para número de vagens por planta (NVP) total e viáveis, número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de plantas do cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	80
Tabela 10 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para teores de Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	94
Tabela 11 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para dos teores Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	95

Tabela 12 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	100
Tabela 13 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	102
Tabela 14 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para altura de plantas e número de perfilhos em população de plantas de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	114
Tabela 15 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para número de espiga por planta (NEP), número de grãos por espiga (NGE), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	119
Tabela 16 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para teores de Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	125
Tabela 17 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	128
Tabela 18 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para altura de plantas e diâmetro de colmo em plantas de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	139
Tabela 19 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), porcentagem de massa seca (PMS), massa seca de raiz (MSR) e relação massa seca de raiz e massa seca de parte aérea de plantas de milho (RRPA) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	142
Tabela 20 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para os parâmetros fisiológicos do milho determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (<i>A</i>), condutância estomática (<i>G_s</i>), concentração de carbono intercelular (<i>C_i</i>), transpiração foliar (<i>E</i>), eficiência fotossintética de uso de água (<i>EUA</i>), eficiência de carboxilação (<i>EC_i</i>) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	149
Tabela 21 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para os parâmetros fisiológicos do milho determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (<i>A</i>), condutância estomática (<i>G_s</i>), concentração de carbono intercelular (<i>C_i</i>), transpiração foliar (<i>E</i>), eficiência fotossintética de uso de água (<i>EUA</i>) e eficiência de carboxilação (<i>EC_i</i>) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	160
Tabela 22 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste <i>F</i> para teores de clorofila A e clorofila B determinados através do clorofilômetro portátil na cultura do milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.	166

Tabela 23 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para teores de Ca, Mg e K no solo após a colheita da parte aérea do milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.....167

Tabela 24 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.....170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Fotossíntese líquida
Al^{3+}	Alumínio (acidez trocável)
ATP	Adenosina trifosfato
C	Carbono
C_3	Plantas de metabolismo fotossintético C_3
C_4	Plantas de metabolismo fotossintético C_4
Ca, Ca^{2+}	Cálcio
CaCl_2	Cloreto de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cálcio dihidratado
CC	Capacidade de campo
C_i	Concentração de carbono intercelular
CO_2	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	Capacidade de troca catiônica do solo
CTC_R	Capacidade de troca de cátions das raízes
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cobre pentahidratado
C.V.	Coeficiente de variação
DAE	Dias após emergência
DAS	Dias após a semeadura
DEA	Demanda evaporativa da atmosfera
E	Transpiração foliar
ECA	Evaporação do tanque classe A
EC_i	Eficiência de carboxilação
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETm	Evapotranspiração máxima da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
EUA	Eficiência fotossintética do uso da água
FAO	Food and Agriculture Organization
FESCON	Fazenda Escola Capão da Onça
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de ferro heptahidratado

G.L.	Graus de liberdade
Gs	Condutância estomática
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
H ₃ BO ₃	Ácido bórico
H+Al	Acidez potencial
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
IRGA	Infrared Gas Analyzer
K, K ⁺	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
Kc	Coeficiente de cultura
KCl	Cloreto de potássio
Kp	Coeficiente de tanque classe A
Ky	Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico
m	Saturação por alumínio
MAP	Fosfato monoamônico
MFPA	Massa fresca de parte aérea
mg	Massa de grãos
Mg, Mg ²⁺	Magnésio
MgCO ₃	Carbonato de magnésio
MGP	Massa de grãos por planta corrigida a 13% de umidade em peso
MgSO ₄ .7H ₂ O	Sulfato de magnésio heptahidratado
MMG	Massa de mil grãos
MnCl ₂ .4H ₂ O	Cloreto de manganês tetra hidratado
MO	Matéria orgânica
MSPA	Massa seca de parte aérea
MSR	Massa seca de raiz
NADPH	Fosfato de dinucleotídeo de adenina e nicotinamida
ns	Não significativo
NEP	Número de espiga por planta
NG	Número de grãos
NGE	Número de grãos por espiga
NGP	Número de grãos por planta
NGV	Número de grãos por vagem
NPK	formulação nitrogênio, fósforo e potássio

NVP	Número de vagens por planta
ns	Não significativo
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
p.a.	Princípio ativo
PG	Percentual de umidade do grão medido
pH	Potencial hidrogeniônico (acidez ativa)
PMP	Ponto de murcha permanente
O ₂ ⁻	Superóxido
ROS	Espécies reativas de oxigênio
RRPA	Relação raiz e parte aérea
S	Enxofre
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
USDA	United States Department of Agriculture
V	Saturação por bases
ZnSO ₄ .7H ₂ O	Sulfato de zinco heptahidratado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS.....	28
2.1 OBJETIVO GERAL	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3.1 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA CULTURA DA SOJA	29
3.2 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DOS CEREAIS DE INVERNO	30
3.3 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA CULTURA DO MILHO	31
3.4 FATOR GENÓTIPO E RESISTÊNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO	32
3.5 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA AS CULTURAS.....	33
3.5.1 Influência e comportamento da água no Cultivo da Soja	34
3.5.2 Influência e Comportamento da Água no Cultivo do Milho.....	36
3.5.3 Influência e Comportamento da Água no Cultivo de Cereais de Inverno	37
3.6 COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO SOLO	39
3.7 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA NA ABSORÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO	41
3.8 IRRIGAÇÃO	41
3.9 DEMANDA EVAPORATIVA DA ATMOSFERA	43
3.10 NUTRIÇÃO DAS PLANTAS	44
3.11 MECANISMO DE ABSORÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO	45
3.12 INTERAÇÃO ENTRE CÁTIOS NO SOLO	45
4 MATERIAL E MÉTODOS	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL, CLIMA E SOLO	48
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVOS	50
4.3 ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DO SOLO E INCUBAÇÃO	51
4.4 MANEJO DA IRRIGAÇÃO	53
4.5 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DA SOJA	54
4.6 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DA CEVADA.....	56
4.7 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DO MILHO.....	56
4.8 VARIÁVEIS-RESPOSTA DAS PLANTAS AVALIADAS NOS EXPERIMENTOS	57
4.8.1 Parâmetros Biológicos da Soja	57
4.8.2 Parâmetros Biológicos da Cevada	58
4.8.3 Parâmetros Biológicos do Milho	59

4.8.4 Parâmetros Ecofisiológicos das Culturas	60
4.8.5 Atributos Químicos do Solo	61
4.8.6 Análise Química da Parte Aérea	61
4.9 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 CULTURA DA SOJA	64
5.1.1 Condições climáticas.....	64
5.1.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo	65
5.1.3 Altura de plantas, inserção de primeira vagem e número de nós.....	70
5.1.4 Número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG)	77
5.1.5 Atributos químicos do solo	94
5.1.6 Atributos químicos da parte aérea.....	99
5.2 CULTURA DA CEVADA.....	107
5.2.1 Condições climáticas.....	107
5.2.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo	109
5.2.3 Altura de plantas e número de perfilhos	114
5.2.4 Número de espiga por planta (NEP), número de grãos por espiga (NGE), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP), e massa de mil grãos (MMG)	118
5.2.5 Atributos químicos do solo	124
5.2.6 Atributos químicos da parte aérea.....	128
5.3 CULTURA DO MILHO.....	131
5.3.1 Condições climáticas.....	131
5.3.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo	134
5.3.3 Altura de plantas e diâmetro de colmo	139
5.3.4 Massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), porcentagem de massa seca (PMS), massa seca de raiz (MSR) e relação massa seca de raiz e massa seca de parte aérea de plantas de milho (RRPA)	141
5.3.5 Fotossíntese líquida (<i>A</i>), Condutância estomática (<i>G_s</i>), Concentração de carbono intercelular (<i>C_i</i>), Transpiração foliar (<i>E</i>), Eficiência fotossintética do uso da água (<i>EUA</i>) e Eficiência de carboxilação (<i>EC_i</i>)	148
5.3.6 Influência do estágio fenológico nos parâmetros fisiológicos	160

5.3.7 Teor de clorofila.....	165
5.3.8 Atributos químicos do solo	166
5.3.9 Atributos químicos da parte aérea.....	170
6 CONCLUSÕES	176
REFERÊNCIAS.....	179

1 INTRODUÇÃO

O manejo da água em sistemas agrícolas irrigados é dependente da demanda hídrica da cultura visando uma maior lucratividade. A aplicação da água nas espécies vegetais deve ser realizada na quantidade ideal e no momento adequado. As culturas agrícolas apresentam fase de elevada demanda de água e alto grau de sensibilidade ao déficit hídrico.

O teor relativo de água na planta é uma variável fisiológica muito importante a ser considerada em estudos ecofisiológicos e agrometeorológicos com vistas à maximização da produção e a qualidade dos produtos agrícolas. O status de água na planta é condicionado pelas condições hídricas do solo e pela demanda evaporativa da atmosfera (DEA), afetando o acúmulo de matéria seca na planta, bem como o crescimento vegetativo da maioria das culturas (Aminifar *et al.*, 2012; Evangelista; Pereira, 2003).

O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera ocorre sob a influência direta ou indireta da DEA. Portanto, a DEA exerce efeito sobre a evaporação pelas folhas da água extraída do solo pelas raízes. A interação entre a DEA e a disponibilidade de água no solo defini a disponibilidade hídrica às plantas.

Quando falta água no solo, as plantas não conseguem retirar do solo a água que perderam para atmosfera para atender a DEA. Assim, as plantas perdem a sua turgescência e as células-guarda se tornam flácidas e os estômatos se fecham. Com isso, a transpiração paralisa e a produtividade primária diminui. A temperatura das plantas aumenta, podendo até, em casos extremos, ocorrer desnaturação proteica. A transpiração vegetal é um mal necessário porque as plantas incorporam CO₂ atmosférico e produzem biomassa mediante à perda de água através dos estômatos para a atmosfera do local de cultivo.

A temperatura do ar e a umidade atmosférica no ambiente de cultivo também afetam as funções fisiológicas das culturas. Ambos elementos meteorológicos condicionam a DEA. Por exemplo, quanto maior a temperatura do ar e quanto menor a umidade relativa do ar, maior será a DEA. Sob DEA relativamente alta, a planta transpira mais, fica com seus estômatos abertos por mais tempo, incorpora maior concentração de CO₂ atmosférico e produz mais. Em contrapartida, sob DEA muito baixa, a planta transpira menos, incorpora menor concentração de CO₂ atmosférico e produz menos.

Segundo Bergamaschi *et al.* (2006), o déficit hídrico durante o período vegetativo compromete o crescimento das plantas devido à redução na área foliar e na síntese de biomassa. Entretanto, durante o período de formação da produção, episódios de falta de água no solo promovem paralisação irreversível das atividades fisiológicas das plantas, de modo a comprometer severamente a produção. O status de água no solo constitui fator de grande importância para assegurar o desempenho fitotécnico de culturas agrícolas sob a luz da agricultura sustentável.

Assim como a adoção da prática de irrigação, uma ótima fertilização do solo é de fundamental importância para a obtenção da melhor resposta agrícola, pois se água e nutrientes não forem bem manejados, as plantas poderão apresentar sintomas de deficiência hídrica e nutricional, comprometendo significativamente a expressão da produtividade das culturas (Morais *et al.*, 2017).

A capacidade das plantas em obter quantidades suficientes de nutrientes para o seu desenvolvimento ideal não depende apenas da concentração e da forma em que o nutriente está disponível no meio de crescimento (Büll; Villas Bôas; Nakagawa, 1998). O balanço de cátions presentes na solução do solo pode afetar a absorção de um determinado nutriente pelas raízes das plantas. Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) competem pelos mesmos sítios de absorção e adsorção e transporte na superfície radicular. O excesso de um nutriente pode inibir a absorção do outro, podendo resultar em sintomas de deficiência nas plantas.

O balanço catiônico no solo pode afetar o desempenho fitotécnico e as respostas fisiológicas das espécies vegetais em estudo. Sob elevada concentração de um determinado cátion na solução do solo, a inibição na absorção de outro cátion pode induzir sintomas de deficiência nutricional e comprometer, portanto, a resposta biológica das plantas. Contudo, a influência do balanço catiônico no solo sobre a produtividade vegetal pode depender também da espécie, do cultivar, do tipo de solo e das condições climáticas reinantes no ambiente de cultivo.

A capacidade de troca de cátions das raízes (CTC_R) é menor em gramíneas do que em leguminosas (Asher; Ozanne, 1961). Para cereais, como milho, trigo e arroz, a CTC_R varia de 100 a 200 mmolc kg⁻¹ de raízes secas, enquanto que para plantas leguminosas, como soja e feijão, a CTC_R varia de 400 a 800 mmolc kg⁻¹ de raízes secas (Fernandes; Souza, 2006). Williams e Coleman (1950) verificaram que a CTC_R da soja foi o dobro da encontrada no milho. Como a CTC_R das plantas interfere na absorção de cátions e a chegada de Ca e Mg até as raízes é regulada pelo

mecanismo de fluxo de massa, é de se supor que a relação Ca:Mg no solo mais adequada para o desenvolvimento das plantas depende da espécie/ CTC_R e do nível de água no solo.

A soja (*Glycine max* L.) e o milho (*Zea mays* L.) estão entre as principais culturas agrícolas de maior importância econômica no Brasil. Em contrapartida, a cultura da cevada (*Hordeum vulgare* L.) possibilita a fabricação de bebidas (cervejas e destilados), a composição de farinhas ou flocos para panificação, a produção de medicamentos, bem como a formulação de produtos dietéticos (Newton *et al.*, 2011). Na alimentação animal, a cevada ainda é empregada como forrageira e como matéria prima para a fabricação de ração. O rendimento biológico de espécies vegetais cultivadas em solo sob condições hídricas, tanto adequadas como inadequadas, em conjugação com a disponibilidade de nutrientes minerais, é dependente das condições meteorológicas locais (Farias; Neumaier; Nepomuceno, 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar e compreender as inter-relações existentes entre o suprimento de água e o balanço catiônico no solo sobre as respostas biológicas de plantas de soja, cevada e milho cultivadas em ambiente protegido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Identificar e quantificar os efeitos de diferentes níveis de umidade do solo e de distintas relações Ca:Mg no solo sobre a expressão dos parâmetros ecofisiológicos, nutricionais e fitotécnicos de soja, cevada e milho.
- (ii) Comparar os valores da evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) de soja, cevada e milho obtidos por gravimetria com aqueles calculados a partir de medidas evaporimétricas feitas por intermédio do emprego do tanque classe A.
- (iii) Determinar os valores do coeficiente de cultura (K_c) de soja, cevada e milho para as condições de ambiente protegido.
- (iv) Examinar as interações entre suprimento hídrico e eficiência agronômica de Ca e Mg para diferentes relações Ca:Mg no solo.
- (v) Identificar e quantificar o impacto de status de água no solo sobre a dinâmica de absorção dos cátions Ca, Mg e K presentes na solução do solo para o desenvolvimento das plantas de soja, cevada e milho.
- (vi) Estudar o impacto do balanço catiônico no solo sob condições de suprimento adequado e inadequado de água no solo para caracterização do desempenho agronômico de soja, cevada e milho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA CULTURA DA SOJA

A cultura da soja é uma das espécies agrícolas de maior importância econômica do Brasil, fazendo com que o país apresente destaque no cenário mundial como um dos líderes na produção e exportação do grão (K. R. Marques *et al.*, 2022), principalmente devido à demanda global de alimentos e ração animal (Cunha; Almeida; Coelho, 2022). De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2024a), Brasil e Estados Unidos representam quase 70% da produção dessa oleaginosa em escala comercial.

No Brasil, as regiões Sul e Centro-Oeste concentram 78,2% da área nacional do plantio de soja (Seixas *et al.*, 2020). O aumento da área plantada e o investimento em pesquisa e no desenvolvimento de cultivares têm aumentado a produtividade (E. D. Costa, 2013). Com uma produção total um pouco acima de 147,3 milhões de toneladas referente à safra de 2023/2024, a soja constitui uma das principais culturas produzidas no Brasil (CONAB, 2024a).

A soja é uma das mais importantes oleaginosas cultivadas no mundo devido ao seu elevado teor de proteína (40%) e de óleo (20%), associado ao grande rendimento de grãos, o que possibilita o seu uso na alimentação animal e humana, a produção de biocombustíveis, dentre outras finalidades (Sedyama; Teixeira; Barros, 2009). A soja pode ser processada em uma infinidade de produtos alimentícios usando grãos maduros ou frescos, os quais estão relacionados a grãos colhidos em diferentes estádios de desenvolvimento até a maturidade fisiológica (R6, R7 e R8) (Carrão-Panizzi *et al.*, 2019).

O aumento do rendimento da cultura da soja por área cultivada é um grande desafio para os pesquisadores (E. D. Costa, 2013). Atualmente, existem diversos cultivares de soja adaptados às diferentes regiões do Brasil, devido ao avanço do melhoramento genético (Seixas *et al.*, 2020). Além da ação dos fatores genéticos, a produtividade agrícola é dependente das condições de solo e clima, principalmente do regime vigente da radiação solar em dada localidade (Argenta; Silva; Sangoi, 2001).

3.2 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DOS CEREAIS DE INVERNO

Os principais cereais de inverno são representados por aveia-branca (*Avena sativa* L.), centeio (*Secale cereale* L.), cevada (*Hordeum vulgare* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) e triticale (X *Triticosecale* Wittmack) (Fontaneli *et al.*, 2009). No geral, essas espécies são utilizadas na produção de grãos para alimentação humana e animal, como forrageiras constituintes de pastagens ou conservadas nas formas de feno e silagem (Fontaneli *et al.*, 2009; Meinerz *et al.*, 2012). Em torno de 35% das terras cultivadas no mundo predomina o cultivo comercial de cereais de inverno (Phillips *et al.*, 1996).

Muitos fatores exercem influência sobre a produtividade dos cereais de inverno, como incidência de pragas, plantas daninhas e doenças e manejo da fertilidade do solo (Hatschbach; Bortolotto; Capitanio, 2004). As doenças foliares caracterizam-se como uma das maiores preocupações no cultivo de cereais de inverno devido ao inverno úmido, com alto índice de precipitação pluvial e menor fotoperíodo, o que torna essencial o controle de doenças por intermédio de fungicidas (Reis; Casa; Medeiros, 2001).

Os cereais de inverno são espécies que também podem ser utilizadas com duplo propósito, ou seja, para produção de forragem precoce e de grãos (H. P. dos Santos *et al.*, 2002; H. P. dos Santos *et al.*, 2006). Nessas culturas são encontradas altas taxas de proteína bruta (24,6%) e baixos teores de matéria seca em estágio vegetativo (14,1%) (Fontaneli *et al.*, 2009). Devido ao seu elevado valor nutritivo, todos os cereais de inverno proporcionam adequado desempenho animal (Stanley, 1999).

A cevada (*Hordeum vulgare* L.) é uma das espécies agrícolas mais antigas do mundo e, em comparação aos outros cereais, está adaptada para desenvolver-se em diversos ambientes e diferentes latitudes (Dawson *et al.*, 2015; Newton *et al.*, 2011). Além de ser utilizada na alimentação humana e animal, a cevada é importante matéria-prima para a indústria cervejeira devido às características do seu malte (Hong; Zhang, 2020). Com uma produção mundial em 2022 de quase 155 milhões de toneladas, a cevada é o quarto cereal mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do arroz, do trigo e do milho (FAOSTAT, 2024). Em território nacional, a estimativa da produtividade do referido cereal inverno na safra de 2024 é de pouco mais de 442 mil toneladas (CONAB, 2024b).

Inicialmente, o cultivo de grãos de cevada era restrito nas áreas onde as condições climáticas eram favoráveis, somente no sul do país com inverno frio e chuvoso. Devido ao aumento da demanda, o cereal acabou sendo cultivado em outras regiões produtoras de grãos como o Centro-Oeste, e está cada vez mais presente em latitudes mais baixas e geograficamente localizado na zona intertropical brasileira (Thomé *et al.*, 2024).

A cultura da cevada é alvo da interferência de vários fatores que limitam o incremento de sua produtividade (Mulatu; Lakew, 2011). Dentre tais fatores, pode-se destacar aqueles que promovem estresses abióticos como acidez do solo, baixa disponibilidade de nutrientes no solo, drenagem insuficiente no perfil do solo, déficits hídricos e práticas agronômicas inadequadas (Agegnehu; Nelson; Bird, 2016). Como a cevada apresenta fermentação inferior ao trigo e menor teor de glúten, para atingir a qualidade exigida pela indústria, é conveniente que a espécie seja cultivada com auxílio da irrigação (A. B. A. dos Santos; Klar; Jadoski, 2008).

3.3 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS DA CULTURA DO MILHO

O milho é uma das principais espécies agrícolas cultivadas no mundo todo (Yu *et al.*, 2022). A cultura do milho possui uma das maiores proporções do mercado global de cereais e consiste no cereal mais produzido no mundo (FAOSTAT, 2024). É cultivado em vários países, tais como China, Estados Unidos da América e Brasil, os quais detêm mais de 60% da produção mundial (USDA, 2024b).

No Brasil, existe uma grande diversidade de sistemas de produção de milho, variando-se desde a agricultura de subsistência, sem utilização de insumos modernos, até lavouras que apresentam o mais alto nível tecnológico (EMBRAPA, 2015). Com uma produção colhida de quase 116 milhões de toneladas referente à safra de 2023/2024, o milho é considerado uma das principais culturas do território brasileiro (CONAB, 2024a). O milho apresenta grande importância socioeconômica no Brasil, pois é matéria-prima para o setor agroindustrial (G. P. Gomes, 2019). O grande desafio dos pesquisadores inerente ao cultivo da referida espécie está voltado ao aumento da produtividade atrelado à redução do custo de produção por intermédio da incorporação de novas tecnologias, tais como a prática da irrigação (Pegorare *et al.*, 2009).

De acordo com os dados da CONAB (2024a), a região Centro Sul é responsável por, aproximadamente, 55% da produção de milho no Brasil. A região Centro-Sul apresenta maiores produtividades médias, tendo sido favorecidas pelo uso de tecnologias avançadas, bem como de sementes de alta qualidade e potencial genético (EMBRAPA, 2015). A área semiárida da região Nordeste caracteriza-se pela agricultura de subsistência e limitação na disponibilidade de água, o que explica a menor produtividade da cultura nesta região (Antonino *et al.*, 2000).

A cultura do milho possui elevada relevância econômica, compreendendo desde a alimentação animal, com 70% do uso deste cereal para este fim, até a indústria de alta tecnologia (Cancellier *et al.*, 2011). Além de sua utilização na alimentação animal, o milho é largamente empregado na alimentação humana e na produção de biocombustíveis (Freitas *et al.*, 2019). Nos Estados Unidos da América o uso do grão de milho para alimentação animal está em torno de 50%, enquanto que no Brasil varia de 60 a 80% (Duarte, 2008 *apud* Cancellier *et al.*, 2011, p. 528).

3.4 FATOR GENÓTIPO E RESISTÊNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO

A escassez hídrica é o fator que mais limita o desenvolvimento de plantas, o que torna a seleção de genótipos resistentes ao déficit hídrico ou que possuam maior eficiência do uso da água uma meta a ser alcançada por melhoristas vegetais (Martins, 2012). Sob o efeito da interação entre o genótipo da espécie vegetal, o ambiente de produção e o manejo agrícola adotado, é possível estabelecer-se o nível de produtividade de uma cultura (F. S. Guimarães *et al.* 2008).

A resistência à seca dos vegetais dentro da mesma espécie varia em função do genótipo (Martins, 2012). Sob condições de seca severa, se um genótipo em particular apresenta produtividade superior à de outro, este genótipo é relativamente mais tolerante à seca (Blum, 2005). A adaptação ao estresse hídrico é o resultado da manutenção de um bom estado hídrico nos tecidos vegetais, o qual pode ser avaliado pelo potencial hídrico foliar, pela resistência dos estômatos à difusão de vapor d'água e pela temperatura da folha (C. M. Guimarães *et al.*, 2015).

Na seleção de genótipos resistentes à seca deve-se buscar aqueles cujo potencial produtivo seja relativamente alto sob condições de déficit hídrico (Tardieu, 2012). Dois princípios podem ser utilizados para obtenção de genótipos adaptados ao

déficit hídrico: o melhoramento para a tolerância à seca e o melhoramento relacionado à eficiência no uso de água (Ferrão *et al.*, 2016).

Os mecanismos de resistência à seca pelos vegetais, segundo Verslues *et al.* (2006), podem ser divididos em escape, retardo e tolerância. No mecanismo de escape, as plantas apresentam como estratégia rápido desenvolvimento fenológico e alto grau de plasticidade, completando o seu ciclo antes que o déficit se torne severo o suficiente para provocar danos fisiológicos. O mecanismo de retardo da desidratação representa a manutenção do turgor e o volume celular pela absorção de água por um sistema radicular bem desenvolvido e/ou pela redução da perda de água por transpiração por meio do fechamento estomático ou por vias não estomáticas, como a cutícula. Na tolerância à seca, a planta mantém sua atividade metabólica mesmo sob redução do potencial hídrico dos tecidos, devido principalmente ao acúmulo de solutos compatíveis ou osmóticos, às proteínas osmoprotetoras e à capacidade antioxidante.

3.5 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA AS CULTURAS

A disponibilidade hídrica é o fator ambiental que mais influencia a distribuição das plantas no globo terrestre (Pimentel, 2004). A produção biológica do solo, tanto para fins florestais como agrônômicos, é afetada pela presença de água (Dane; Topp, 2002). Os processos fisiológicos envolvidos na produção das culturas estão fortemente relacionados à disponibilidade de água para as plantas (Carvalho; Oliveira, 2012).

Além de participar da constituição dos tecidos vegetais, a água é fundamental para os processos bioquímicos e fisiológicos, atuando como solvente universal para possibilitar o transporte de minerais, gases e solutos no sistema solo-planta-atmosfera, bem como para promover a regulação térmica das plantas por intermédio da transpiração no sistema planta-atmosfera (A. R. Costa, 2001). Representando 90% da massa total das plantas, a água é tida como o principal constituinte do tecido vegetal (Seixas *et al.*, 2020).

Situações de deficiência hídrica induzem adaptações fisiológicas e morfológicas, tais como fechamento parcial ou total dos estômatos, reduzindo assim a fotossíntese, e afetando adversamente o crescimento da cultura e a sua produtividade primária (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

Os efeitos do déficit hídrico sobre os vegetais variam de acordo com a sua intensidade, a velocidade de imposição do estresse e do estágio de desenvolvimento da planta (Pimentel, 2004). Em ambientes com restrição hídrica, a produtividade das culturas é frequentemente influenciada por atributos da planta que possibilitam a manutenção do status hídrico durante o dessecamento do solo (Blum, 2005). A reposição hídrica é de grande importância para plantas cultivadas em épocas de suprimento inadequado de água no solo (Moraes *et al.*, 2017). A precipitação excessiva reduz a oxigenação dos solos, o que diminui a atividade funcional das raízes e a absorção de água e nutrientes (Sentelhas; Monteiro, 2009).

A resposta das culturas a diferentes situações de disponibilidade hídrica e de retorno econômico pode ser estimada através da adoção da técnica de modelagem de crescimento e desenvolvimento das culturas (J. C. Silva *et al.*, 2011). Nas análises de produção agrícola sob condições de escassez de água, as funções de produção água-cultura são de grande importância (Vivan *et al.*, 2013).

3.5.1 Influência e comportamento da água no Cultivo da Soja

A água é crucial para o crescimento e o desenvolvimento da soja durante todo ciclo da cultura, exceto após a fase de maturidade fisiológica dos grãos, quando o excesso de precipitação retarda o processo de secagem natural, comprometendo a qualidade de grãos e sementes (Seixas *et al.*, 2020). Os estádios fenológicos referentes a germinação-emergência e a floração-enchimento de grãos são considerados críticos em relação ao suprimento hídrico (T. R. Rodrigues *et al.*, 2017; Seixas *et al.*, 2020).

Para obtenção de elevadas produtividades de soja, as necessidades hídricas variam de 450 a 825 mm por ciclo, dependendo do clima, do solo, do cultivar e das práticas de manejo (Steduto *et al.*, 2012). Os fatores duração de ciclo da cultura e data de semeadura podem influenciar de forma significativa as necessidades hídricas da cultura e, conseqüentemente, a expressão da produtividade (Peiter, 2010).

A necessidade de água da cultura da soja aumenta com o desenvolvimento da planta, sendo máximo durante a floração-enchimento de grãos, e reduzindo após esse subperíodo (Farias; Neumaier; Nepomuceno, 2009; Seixas *et al.*, 2020). As plantas de soja são relativamente tolerantes ao déficit hídrico durante a fase vegetativa, mas apresentam grande sensibilidade ao estresse hídrico na fase de formação dos

componentes de rendimento, ou seja, florescimento e enchimento de grãos (Sentelhas *et al.*, 2015). De acordo com Doorenbos e Kassan (1994), os valores do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) da cultura da soja são de 0,2, 0,8 e 1,0 para as fases vegetativa, reprodutiva e de maturação, respectivamente.

Mesmo sob alta tecnificação das lavouras de soja no território brasileiro, a baixa disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura representa o principal fator para a não obtenção do potencial produtivo das culturas, principalmente no Sul do Brasil, na região Nordeste e em algumas localidades da região Centro-Oeste (Seixas *et al.*, 2020). No Sul do Brasil, as alterações anuais na produtividade de soja são resultado das oscilações no regime pluviométrico, fortemente influenciado pelas anomalias climáticas conhecidas como El Niño e La Niña (Berlato; Fontana, 1999). Para a elevação da produtividade da soja em locais onde a precipitação pluviométrica não atende às exigências hídricas da cultura, a complementação hídrica através da prática da irrigação se torna necessária (Vivan *et al.*, 2013).

Avaliando o rendimento da cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS, em nove cenários, referentes à época de semeadura e ao ciclo do cultivar por intermédio do modelo de simulação WINISAREG, Vivan *et al.* (2013) observaram aumentos na produção de grãos de soja à medida em que se aumentava a lâmina complementar de irrigação. Os autores verificaram também que sob situações em que não foi possível suprir a necessidade hídrica total da cultura, quebras de produtividade foram detectadas. As reduções de rendimento em função dos percentuais de lâminas de irrigação adotadas oscilaram de 25% sob semeadura em 15/12 para cultivares de ciclo precoce a 42% sob semeadura em 15/10 para cultivares de ciclo tardio.

Num experimento conduzido com a cultura da soja em Salto, Uruguai, Montoya *et al.* (2017) avaliaram a produtividade da soja irrigada em dois anos agrícolas (2014-2015 e 2015-2016). Nesse trabalho foram considerados quatro tratamentos, sendo três irrigados e um não irrigado. Os tratamentos irrigados receberam 100% das exigências hídricas da cultura durante o estágio vegetativo. Entretanto, esses três tratamentos receberam diferentes porcentagens de água de acordo com as exigências hídricas da cultura durante a fase reprodutiva. Essas porcentagens foram 100%, 75% e 25% da ET_m . Os referidos autores constataram que a biomassa sob imposição dos três tratamentos irrigados variou de 8414 a 9027 kg ha⁻¹. A produtividade sob aplicação de tais tratamentos irrigados oscilou de 3730 a 4173 kg ha⁻¹. Para o

tratamento não irrigado, a biomassa e a produtividade foram de 6344 e 2689 kg ha⁻¹, respectivamente.

3.5.2 Influência e Comportamento da Água no Cultivo do Milho

O milho é um cereal que possui alta exigência em água durante o seu ciclo de desenvolvimento (Cruz *et al.*, 2010). Entretanto, o milho é uma das culturas que apresenta maior eficiência do uso de água, ou seja, produz uma grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida (EMBRAPA, 2015).

Podendo ser cultivado em regiões onde as precipitações variem entre 250 e 5000 mm anuais (Cruz *et al.*, 2010), o milho necessita de 400 a 600 mm de água, bem distribuídos, durante todo o ciclo de cultivo para obtenção de boas produtividades (Doorenbos; Kassam, 1979; Fancelli; Dourado Neto, 2004). O consumo médio diário de água pela planta de milho depende das condições climáticas e da fase fenológica, variando entre 2,5 mm dia⁻¹ e 10 mm dia⁻¹ (Cruz *et al.*, 2010).

As oscilações nas safras agrícolas de milho oriundas das regiões produtoras mais importantes do Brasil estão relacionadas à disponibilidade de água, principalmente desde a etapa de pendoamento até o início do enchimento de grãos - subperíodos estes considerados mais críticos à falta d'água para o crescimento e o desenvolvimento da cultura (Bergamaschi *et al.*, 2004; Bergonci *et al.*, 2001). Durante estes subperíodos, a transpiração vegetal é elevada devido a máxima área foliar e aos processos de formação do embrião e enchimento de grãos de milho (A. C. S. Almeida *et al.*, 2017). Bergamaschi *et al.* (2004) detectaram quebra de rendimento na cultura do milho em função de déficit hídrico durante as etapas fenológicas de florescimento e enchimento de grãos, mesmo em anos com totais de precipitações anuais normais acima da média climatológica e relativamente bem distribuídas nas principais regiões produtoras.

Durante o subperíodo de florescimento, o déficit hídrico provoca redução significativa no rendimento em decorrência da dessecação dos estilos-estigmas, do aborto dos sacos embrionários, de distúrbios na meiose, do aborto das espiguetas e da morte dos grãos de pólen (Cruz *et al.*, 2010). Durante a fase de enchimento de grãos, o metabolismo da planta e o fechamento de estômatos são afetados pelo déficit hídrico, o qual, por sua vez, reduz a atividade fotossintética e, conseqüentemente, a produção de fotoassimilados e sua translocação para os grãos (Cruz *et al.*, 2010).

Avaliando diferentes estratégias de manejo da irrigação sobre a produtividade de milho na região de Dourados, MS, A. C. S. Almeida *et al.* (2017) obtiveram sob o efeito do tratamento de sequeiro redução na altura de plantas, no número de espigas, na matéria seca de plantas e no índice de colheita em relação aos tratamentos irrigados. Os tratamentos utilizados neste trabalho foram cultivo sob condições de sequeiro (T1), cultivos com irrigação complementar quando as tensões de água no solo atingiam 40 KPa (T2) e 20 KPa (T3) e cultivo irrigado com base na evapotranspiração máxima da cultura (T4). Os autores obtiveram rendimentos de 3800, 9644, 8883 e 8337 kg ha⁻¹ para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. A produtividade advinda dos tratamentos irrigados foi superior em mais de duas vezes em relação ao tratamento de sequeiro. A menor produtividade obtida em parcelas submetidas ao tratamento de sequeiro foi atribuída a déficit hídrico severo ocorrido durante o ciclo da cultura devido a vários veranicos, principalmente por ocasião da fase de emissão dos pendões. Dentre os tratamentos irrigados, os autores não observaram diferenças significativas, indicando que sob manejo da irrigação baseada no uso de sensores tensiométricos é recomendável iniciar-se a irrigação a partir do momento em que a tensão de água no solo atingir limiares próximos de 40 KPa.

No município de Eldorado do Sul, RS, avaliando o impacto do déficit hídrico sobre o rendimento de grãos de híbridos de milho e a eficácia da irrigação durante todo o ciclo no transcorrer de 10 anos de experimentação, Bergamaschi *et al.* (2006) constataram que a lâmina de irrigação máxima, definida sob condição de umidade do solo na ou próxima da capacidade de campo, proporcionou aumento de, aproximadamente, 70% na produtividade em relação à cultura não irrigada. No decorrer deste período de 10 anos de experimentação, a produtividade sob irrigação máxima variou de 7500 kg ha⁻¹ a 12500 kg ha⁻¹. As plantas submetidas à irrigação intermediária, sob dose de rega média próxima a 60% da irrigação completa, apresentaram aumento no rendimento na ordem de 50%.

3.5.3 Influência e Comportamento da Água no Cultivo de Cereais de Inverno

A água é um dos fatores mais importantes no crescimento e desenvolvimento de cereais de inverno (Fontaneli *et al.*, 2012). O consumo de água varia de 200-500 mm para a cultura do trigo e de 100-500 mm para a cultura da cevada (Steduto *et al.*,

2012), dependendo das condições edafoclimáticas locais e também do genótipo cultivado.

As exigências hídricas são mais intensas nos estádios de florescimento até o início da formação de grãos (Floss *et al.*, 2009). Dessa forma, os cereais de inverno possuem como estádios fenológicos críticos à falta de água aqueles correspondentes ao emborrachamento e ao espigamento, reduzindo assim o número de grãos por espiga (Bellido, 1991). O déficit hídrico na fase de enchimento de grãos limita o rendimento de grãos e a qualidade industrial (Caeirão; Cunha; Pires, 2009).

Além de elevados índices pluviométricos, o trigo necessita de uma boa distribuição de água durante sua estação de crescimento para alcançar uma produtividade de 3500 kg ha⁻¹ (Brunetta *et al.*, 2006). Na cultura da cevada, a utilização de sistemas de irrigação para suprir de forma total ou suplementar as necessidades hídricas da espécie é de grande importância para garantir altas produtividades (Sanches *et al.*, 2015).

Em um estudo que avaliou o efeito do estresse hídrico sobre a eficiência de conversão da radiação solar em produção de matéria seca de cereais, Oviedo, Herz e Rudorff (2001) observaram que a falta de água reduziu a eficiência de conversão da radiação solar para produção de grãos, em função do estágio fenológico da cultura. As reduções da eficiência de conversão da radiação solar foram de 15,7% e 39,4% para os subperíodos de perfilhamento e emborrachamento, respectivamente.

Avaliando o crescimento dos cultivares de trigo Anahuac e IAC-24 submetidas a diferentes tratamentos de água no solo, Fumis, Pedras e Sampaio (1997) constataram redução da matéria seca de parte aérea, da matéria seca total da planta e da área foliar em função de status de água no solo. Os referidos autores conduziram o trabalho experimental em túnel de vegetação no município de Bauru, SP, aplicando-se três regimes de umidade do solo: -0,027 a -0,1 MPa (T1), -0,027 a -0,045 MPa (T2) e -0,027 MPa (T3). Para a estimativa da matéria seca de parte aérea, da matéria seca total da planta e da área foliar, amostras de plantas foram coletadas 18 dias após o transplântio (momento em que se iniciou a diferenciação dos tratamentos de água) repetidamente a cada 14 dias, totalizando cinco coletas de material vegetal.

Na última coleta os valores médios de matéria seca do cultivar Anahuac foram de 8,17; 8,97 e 11,04 g sob os regimes hídricos T1, T2 e T3, respectivamente, enquanto que os valores médios do cultivar IAC-24 em função dos mesmos tratamentos de água no solo foram de 8,16; 9,76 e 12,21 g. A matéria seca total de

planta do genótipo Anahuac foi de 10,45; 11,17 e 13,14 g sob níveis de umidade do solo correspondentes aos tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente. Em contrapartida, o cultivar IAC-24 apresentou valores médios de matéria seca total de planta que foram de 10,22; 12,27 e 15,17 g sob os regimes hídricos T1, T2 e T3, respectivamente. Os valores médios de área foliar do cultivar Anahuac foram de 869,21; 1036,95 e 1188,73 cm² sob os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente, ao passo que, a referida variável-resposta do genótipo IAC-24 apresentou valores de 903,39; 1106,07 e 1364,03 cm² sob os mesmos tratamentos de suprimento de água do solo.

Com o objetivo de calibrar e validar o modelo de simulação AquaCrop para avaliar a produtividade da cultura da cevada no período de três anos em Mekelle, Etiópia, Araya *et al.* (2010) observaram que a irrigação complementar aumentou ligeiramente o rendimento de grãos e a biomassa. O experimento foi conduzido nos anos de 2006, 2008 e 2009. No ano de 2008 e 2009, os referidos autores consideraram quatro datas de semeadura: 4 de julho (condições de sequeiro), 10 de julho (condições de irrigação), 12 de julho (condições de sequeiro) e 22 de julho (condições de sequeiro). Em 2006, a semeadura se deu apenas em 10 de julho (condições de sequeiro e de irrigação). A irrigação complementar foi adotada após cessar a estação chuvosa mediante aplicação de lâminas de água de 10-15 mm a cada 3-4 dias com intuito de fazer com que o conteúdo de água no solo retornasse à capacidade de campo.

3.6 COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO SOLO

A água no solo constitui fator de suma 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, a compactação, a aeração e o desenvolvimento radicular (Dane; Topp, 2002; V. A. Rodrigues *et al.*, 2012). A água no solo atua como “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 um 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; 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; Topp, 2002).

O conhecimento do movimento de água no solo é essencial para resolver os problemas que envolvem irrigação, drenagem, conservação do solo e da água, recarga e poluição de aquífero, bem como aqueles relacionados à infiltração e ao controle de escoamento (A. J. P. Silva; Coelho, 2014). A água que infiltra após uma precipitação é a quantidade que realmente contribui para o armazenamento de água no solo (J. C. Silva *et al.*, 2011).

A avaliação da disponibilidade da água no solo requer desenvolvimento de estudos muito complexos em função da heterogeneidade do solo e 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 (V. A. 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 (V. A. Rodrigues *et al.*, 2012). Durante o processo de infiltração, o perfil do solo é constituído pela zona de saturação dentro da qual o solo está saturado. Em seguida vem a zona de transição com um rápido decréscimo de água. Posteriormente, existe a zona de transmissão, a qual se refere à 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 faz alusão 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).

3.7 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA NA ABSORÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO

Na solução do solo, os íons são transportados às raízes por fluxo de massa ou por difusão, sendo o fluxo de massa associado ao gradiente potencial total que regula o movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera (Ruiz; Miranda; Conceição, 1999). De acordo com Barber (1974), a quantidade de íons transportados por fluxo de massa é determinada pela concentração de íons na solução do solo e pela taxa de transpiração do vegetal.

O movimento de água no solo se dá, na maior parte das vezes, por fluxo de massa (Taiz *et al.*, 2017). Na solução do solo, os macronutrientes Ca e Mg são transportados por fluxo de massa (Barber, 1974). Por meio do fluxo convectivo da água referente ao fluxo de massa, os nutrientes chegam à superfície das raízes das plantas (Kerbaudy, 2004).

Como os nutrientes são transportados para as raízes pela água, a escassez hídrica provoca a redução do fluxo de massa de nutrientes solúveis na água, como o Ca e o Mg (Clair; Lynch, 2010). Dessa forma, situações de déficit hídrico afetam negativamente a nutrição mineral e o crescimento das plantas (D. M. Marques, 2019).

Os ambientes com excesso de água diminuem a concentração de oxigênio no meio agrícola, paralisando o crescimento e a respiração das raízes, além de reduzir consideravelmente a absorção e o transporte de nutrientes para a parte aérea das plantas (Romero *et al.*, 2003). A concentração de nutrientes é reduzida, mesmo se a matéria seca da parte aérea continuar aumentando em decorrência do processo de diluição (Marschner, 1995).

3.8 IRRIGAÇÃO

A agricultura irrigada constitui importante técnica de manejo dos recursos hídricos, a qual possibilita a otimização da produção mundial de alimentos (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2007) e possui como finalidade suprir as necessidades hídricas das culturas (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002). O manejo da irrigação promove a geração de empregos, o aumento da renda e a redução do êxodo rural, melhorando as condições de vida da população do campo (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2007). A irrigação é atividade fundamental em regiões que apresentam secas regulares (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

Diversos benefícios são promovidos através da prática de irrigação, tais como maior eficiência no uso de recursos hídricos e de fertilizantes, aumento da produtividade pela ampliação do tempo de exploração e do número de colheitas, melhoria da qualidade do produto agrícola, preservação do solo, controle eficiente de patógenos, pragas e plantas daninhas, bem como melhor prognóstico de produção, pois o sistema não depende de forma exclusiva das precipitações pluviométricas para garantir altos níveis de rendimento (Salassier; Soares; Mantovani, 2008).

O manejo da irrigação constitui atividade de considerável complexidade devido ao conhecimento necessário relativo à identificação de diversas variáveis, tais como o equipamento de irrigação (lâmina de irrigação), o solo (infiltração, armazenamento e disponibilidade de água), a cultura (profundidade do sistema radicular, altura de plantas, índice de área foliar, fator de cobertura de solo, entre outras) e o regime de chuvas do local (Z. B. Oliveira *et al.*, 2020). Um manejo adequado de irrigação possui como finalidade aplicação da água no solo sob taxas compatíveis às exigências das culturas, proporcionando uma grande produção econômica e uma excelente eficiência do uso da água como fator de produção (A. M. Almeida, 2019).

Uma grande dificuldade encontrada na agricultura irrigada se refere à complexidade e às particularidades regionais dos problemas enfrentados pelo produtor, com vistas à proposição de soluções a serem implementadas em cada propriedade rural (Frizzzone, 2017). O conhecimento da qualidade da irrigação é fundamental para se evitarem prejuízos financeiros e de degradação física, química e biológica do sistema solo-planta-atmosfera em áreas de alto investimento tecnológico, podendo ser avaliada pelo conhecimento da sua efetividade e da eficiência do uso da água pelas plantas (Saad; Libardi, 1994). O termo efetividade da irrigação, segundo Frizzzone (1992), descreve qualitativamente a eficiência de aplicação, a uniformidade de distribuição e a eficiência de armazenamento da água no solo.

Os sistemas de irrigação compõem conjuntos de técnicas que têm como função distribuir água às culturas agrícolas em conformidade com as suas necessidades hídricas, visando ao desenvolvimento vegetal adequado com um mínimo de perdas (Mello; Silva, 2007). Basicamente, um projeto de irrigação é constituído pelo sistema de irrigação e pelo sistema de drenagem, quando necessário (Mello; Silva, 2007). 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). Ainda de acordo com

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.

O uso da irrigação deixou de ser uma simples prática de aplicação e controle de água na agricultura para se transformar em importante instrumento de otimização da produção, da produtividade e da rentabilidade da propriedade rural (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2007). Para isso é necessário que a lâmina de água a ser aplicada atenda a DEA, a qual governa a exigência hídrica das plantas em dada localidade climática (Carvalho; Oliveira, 2012).

3.9 DEMANDA EVAPORATIVA DA ATMOSFERA

A radiação solar, a velocidade do vento, a umidade atmosférica e a temperatura do ar determinam a demanda evaporativa da atmosfera (DEA) (Randin *et al.*, 2003). De acordo com Giongo (2011), a DEA é a capacidade que o ar atmosférico tem de retirar água da superfície evaporante, sendo crucial para manter o ciclo hidrológico e, principalmente, para definir as necessidades hídricas e nutricionais das plantas em função das condições edafoclimáticas reinantes em dada localidade ou região.

Uma maior DEA será observada quanto maior for a disponibilidade de energia solar, de temperatura do ar e de velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa do ar, acarretando aumento nas taxas de evapotranspiração, se a umidade do solo não for fator restritivo (L. D. B. Silva; Folegatti; Villa Nova, 2005). A umidade relativa do ar é um fator de grande influência no processo evaporativo, pois uma alta demanda evaporativa está relacionada a uma baixa umidade relativa (Giongo, 2011).

Condições em que a DEA é alta estão relacionadas a altos valores de déficit pressão de vapor do ar, os quais provocam fechamento parcial ou total dos estômatos, comprometendo a assimilação de dióxido de carbono e promovendo redução na taxa fotossintética das plantas e da condutância estomática (Tatagiba; Pezzopane; Reis, 2007). Ray *et al.* (2002) afirmam que sob condições de alta DEA, as plantas apresentam taxa de transpiração elevada, sendo necessário maior fluxo de água do solo para suprir a transpiração. Porém, vale destacar que se a demanda evaporativa for elevada demais, mesmo que o solo se encontre na ou próximo da capacidade de campo, as plantas não conseguirão retirar do solo aquela água que perderiam para a atmosfera de modo a atender a DEA. Aí os tecidos vegetais perdem a sua turgescência, as células-guardas tornam-se flácidas, os estômatos se fecham, a

transpiração estomatal paralisa, a fotossíntese líquida diminui e a produtividade reduz drasticamente.

3.10 NUTRIÇÃO DAS PLANTAS

A fertilização com nutrientes minerais é fundamental para a obtenção de altas produtividades agrícolas (Taiz *et al.*, 2017). Para a determinação das necessidades nutricionais de uma planta, a composição química e o acúmulo de nutrientes nas folhas e nos frutos são informações fundamentais (E. B. Silva *et al.*, 2017). Cada nutriente possui uma função específica no metabolismo da planta, porém os sinais de deficiência ou excesso dependem de sua mobilidade no floema (Araújo, 2018).

Devem ser consideradas as condições de fertilidade do solo, identificando-se os fatores limitantes e avaliando-se a disponibilidade dos nutrientes na solução do solo e, desta forma, adaptando-se às práticas de calagem e adubação a cada situação em particular (Raij, 1983). A concentração de um determinado nutriente na solução do solo é função de seu teor trocável e de seu grau de saturação no complexo de troca, além da natureza dos outros íons adsorvidos (Hernández, 1994).

Na solução do solo, as raízes das plantas retiram os nutrientes que necessitam para o seu crescimento e desenvolvimento (Kerbaudy, 2004). Para que as plantas possam absorver os nutrientes, estes devem estar presentes na solução do solo e precisam ser carregados na direção das raízes ou devem participar da rota de crescimento do sistema radicular das plantas (Rosolem *et al.*, 2003).

A disponibilidade de nutrientes na rizosfera depende, dentre outros fatores, da concentração do nutriente na solução do solo e do transporte deste para a superfície radicular (Chen; Gabelman, 2000). A concentração do nutriente na solução do solo é de suma importância para o transporte deste nutriente para o sistema radicular das culturas (Marschner, 1995).

Os nutrientes chegam até as raízes basicamente por meio de três mecanismos: interceptação radicular, difusão e fluxo de massa (R. H. Oliveira; Rosolem; Trigueiro, 2004). A interceptação radicular ocorre quando os nutrientes são interceptados pelas raízes durante o seu processo de crescimento, sendo pequena a porcentagem do nutriente suprida por este mecanismo (Marschner, 1995). A difusão é caracterizada pelo movimento de íons em direção à raiz, em virtude do gradiente de concentração gerado na superfície radicular (Barber, 1984), ao passo que o fluxo de massa está

condicionado ao gradiente de potencial químico da água provocado pela absorção de água pelas plantas, a qual é um resultado da transpiração vegetal (D. J. Silva; Alvarez; Ruiz, 1998).

3.11 MECANISMO DE ABSORÇÃO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO

O Ca e o Mg são transportados até a superfície das raízes das plantas pelo processo de fluxo de massa e são absorvidos nas suas formas iônicas de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Araújo, 2018; Malavolta, 2005; Raij, 1983). Em uma proporção bem menor, Ca^{2+} e Mg^{2+} também podem chegar até as proximidades das raízes por interceptação radicular (Kerbaudy, 2004). O processo de fluxo de massa contribui com aproximadamente 70% e 85% para o transporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} da solução do solo até a rizosfera, respectivamente (Raij, 2011).

A absorção de Ca^{2+} pelas plantas é maior que a de Mg^{2+} (Kerbaudy, 2004). O íon Mg^{2+} é menor que o Ca^{2+} , porém ele apresenta um raio de hidratação maior, fazendo com que a sua absorção seja reduzida na presença de outros íons, como o Ca^{2+} (Kerbaudy, 2004).

3.12 INTERAÇÃO ENTRE CÁTIONS NO SOLO

Os cátions K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} interagem entre si tanto no solo como nas plantas, (Reis Júnior, 1995). Íons que apresentam propriedades químicas semelhantes competem pelos mesmos sítios de adsorção, absorção e transporte na superfície radicular, o que normalmente acontece entre K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Fageria; Baligar; Jones, 1991). Essa competição iônica na solução do solo resulta no antagonismo existente entre esses cátions (Malavolta, 1976). Assim, esses cátions podem ser considerados em conjunto devido a influência que cada nutriente exerce sobre a disponibilidade de outro (Raij, 1983).

O Ca e o Mg se inter-relacionam na nutrição de plantas devido às propriedades químicas similares, tais como raio iônico, valência, grau de hidratação e mobilidade, as quais proporcionam competição pelos sítios de adsorção no solo e na absorção pelas raízes (Medeiros *et al.*, 2008). Devido a essa interação entre os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , Hiatt e Leggett (1974) e Orlando Filho *et al.* (1996 *apud* Holzschuh, 2007, p. 24) sugerem que a presença de um desses cátions pode limitar os processos de adsorção

e absorção do outro. O fornecimento equilibrado de cátions básicos e a eficiência das plantas em obter quantidades adequadas de um nutriente é dependente da associação dos valores da relação Ca:Mg do corretivo agrícola, com aqueles encontrados na análise química do solo (Hernández, 1994).

No complexo de troca, Yadare e Girdhar (1981 *apud* Salvador, Carvalho e Lucchesi, 2011, p. 28) afirmam que o Ca apresenta maior preferência em relação ao Mg. Segundo Adams e Henderson (1962) e Hortenstine e Ozaki (1961), a disponibilidade e o aproveitamento de Mg pelas plantas reduzem quando a acidez do solo é corrigida pela adição de CaCO_3 . Por outro lado, existem na literatura relatos de redução na absorção de Ca decorrente da presença de altas concentrações de Mg na solução do solo (Dechen, 1983).

A capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, teoricamente, deve ser ocupada com 65% de Ca, 10% de Mg e 5% de K, o que resulta em relações Ca:Mg, Ca:K e Mg:K equivalentes a 6,5:1, 13:1 e 2:1, respectivamente (E. L. Oliveira; Parra, 2003). Porém, existe uma grande quantidade de contribuições científicas na literatura que reporta resultados contraditórios. Segundo F. A. Oliveira, Carmello e Mascarenhas (2001), essa proporção varia de acordo com a cultura, com o tipo de solo e com o nível de saturação por bases. Usherwood (1982 *apud* Hernández, 1994, p. 09) afirma que nem sempre as relações calculadas para a identificação da melhor proporção entre cátions em solos e plantas correlacionam bem com a produção.

Com a finalidade de avaliar os teores foliares em plantas de soja cultivadas em casa de vegetação sob o efeito do balanço catiônico, Salvador, Carvalho e Lucchesi (2011) utilizaram sete relações Ca:Mg e um tratamento controle. As relações Ca:Mg foram 1:0, 10:1, 3:1, 1:1, 1:3, 1:10 e 0:1. Os autores observaram diferenças significativas nos teores de Ca e Mg. Os maiores teores de Ca nas folhas foram obtidos com as relações Ca:Mg 1:0 e 10:1, enquanto que o menor teor de Ca foi constatado na relação Ca:Mg de 0:1. As relações Ca:Mg de 1:10 e 0:1 proporcionaram maiores teores foliares de Mg. Esses resultados demonstraram que quanto maiores as relações molares entre Ca e Mg na solução do solo, maiores os teores foliares de Ca, enquanto que as menores relações Ca:Mg resultaram em maior concentração de Mg nas folhas. Hernández e Silveira (1998) observaram que baixos teores de Mg na solução do solo, ocasionados pelo uso de corretivos agrícolas com grande quantidade de Ca, proporcionaram redução na produtividade das plantas.

Alterações nas concentrações de Ca e Mg no tecido da alfafa foram observadas por F. T. Gomes *et al.* (2002) e Moreira, Carvalho e Evangelista (1999) sob diferentes relações de Ca:Mg, resultando em maiores teores de Ca e redução de Mg com o aumento da relação Ca:Mg do corretivo agrícola. Cultivando soja e milho em casa de vegetação para testar relações de Ca:Mg que variavam de 50:1 a 1:50, Key, Kurtz e Tucker (1962) verificaram aumento nos teores de Mg no tecido à medida que reduziram as relações molares. As diferentes concentrações de Ca e Mg no tecido vegetal das plantas em função dos teores desses nutrientes no solo, bem como as suas relações molares no tecido vegetal, não seguem o mesmo padrão das relações molares no solo (Holzschuh, 2007).

Trabalhando com mudas de cafeeiro, E. F. Oliveira, Pavan e Chaves (1994) verificaram efeitos significativos do aumento da saturação de Ca na CTC do solo sobre o rendimento de matéria seca. Lima *et al.* (1981) observaram maior produção de matéria seca de tomate nas relações Ca:Mg no solo e no corretivo agrícola de 1:1 e 1,8:1, respectivamente.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL, CLIMA E SOLO

Os estudos foram realizados em casa de vegetação da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) sob a proposição de três experimentos (Figura 1). O experimento 1 foi instalado e conduzido com a cultura da soja, considerando dois genótipos distintos, IAC Foscari-31 e BMX Zeus IPRO. O experimento 2 contemplou a instalação e condução de cereais de inverno, considerando a cultura da cevada, cultivar Imperatriz. O experimento 3 foi conduzido com a cultura do milho, híbrido K7 500 VIP3, até o início da fase de pendramento. As coordenadas geográficas da localidade estudada foram 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.

O município de Ponta Grossa, segundo a classificação de Köppen e Geiger, apresenta clima do tipo 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. (Alvares *et al.*, 2013). A localidade possui temperaturas médias mensais em torno de 18,3 °C, com precipitação acumulada anual em torno de 1505 mm, conforme Figura 2.

A casa de vegetação da marca Van der Hoeven foi constituída por uma estrutura de aço galvanizado a fogo, com cobertura de filme plástico de 150 micras de espessura e teto em formato de arcos oblongos. Apresenta a dimensão de 18,4 x 12,9 m, sendo constituída por quatro ventiladores de exaustão, uma bomba de água e sistema de irrigação. Na casa de vegetação existia um sensor DHT22 conectado a uma placa Arduino destinado a coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar a cada minuto. Porém, devido a um problema no sistema de aquisição de dados no equipamento, esse sensor não foi utilizado durante a condução do experimento com a cultura da soja.

O tipo de solo empregado para o cultivo da soja, da cevada e do milho foi um Cambissolo. O local de coleta do solo para os três experimentos foi definido após a análise química realizada pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Estadual de Ponta Grossa a partir de amostras coletadas de diferentes locais da Fazenda Escola Capão da Onça (FESCON). Posteriormente, o solo foi coletado na

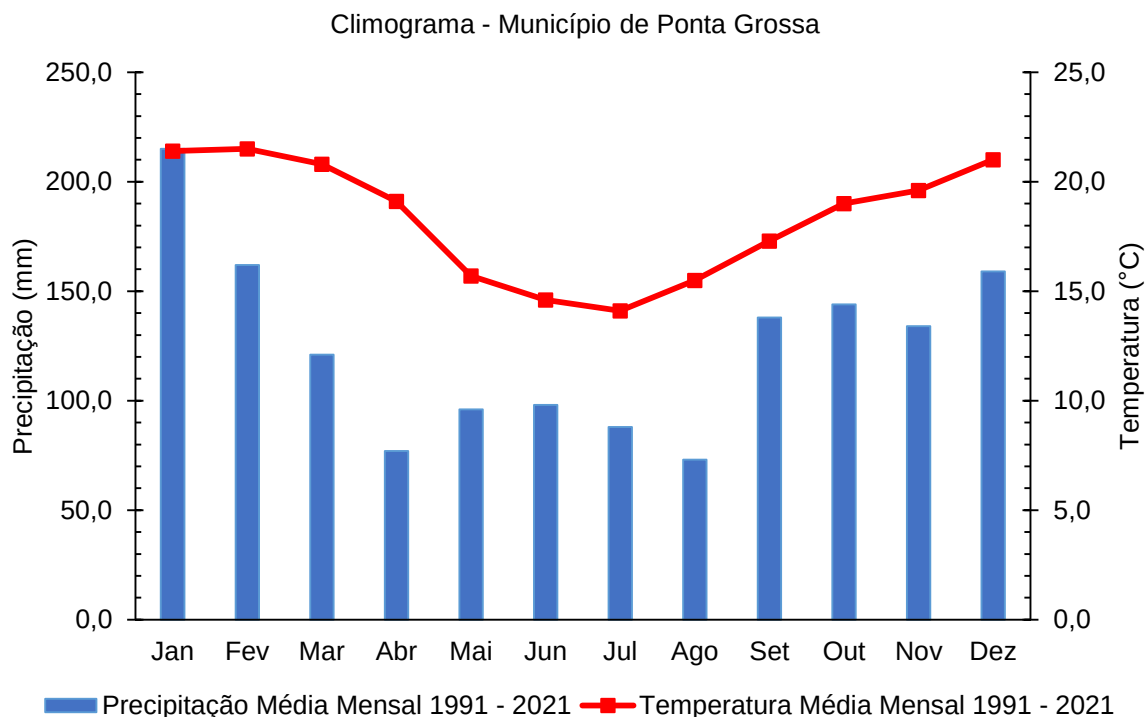
camada de 0–20 cm de profundidade, peneirado para retirar torrões e outros detritos, homogeneizado e seco ao ar.

Figura 1 – Visualização das plantas de soja, de cevada e de milho cultivadas em vasos em ambiente protegido durante as safras 2022/2023. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Figura 2 – Sequenciamento dos valores normais da temperatura média e da precipitação no município de Ponta Grossa. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: Climate Data – Dados climáticos para cidades mundiais. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org>>. Acesso em: 8 dez. 2024.

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVOS

Os experimentos foram conduzidos em delineamento experimental blocos casualizados, com tratamentos distribuídos em arranjo fatorial 4×4 e três repetições. Os tratamentos foram constituídos de quatro níveis de água (60%, 80%, 100% e 120% da ETm) e quatro relações Ca:Mg no solo (1:1, 3:1, 6:1 e 9:1), os quais foram aplicados nas culturas de soja, cevada e milho.

Os tratamentos de água no solo foram definidos a partir do conhecimento do uso consumptivo das culturas a serem estudadas (ETm). Assim, frações de ETm foram adotadas nos três experimentos com vistas à avaliação do impacto de tratamentos de água e balanço catiônico no solo sobre as variáveis-resposta, as quais foram expressas pelos parâmetros fitotécnicos da soja, da cevada e do milho.

Os tratamentos de irrigação para soja foram iniciados quando as plantas apresentavam o primeiro trifólio totalmente aberto. Na cevada, os tratamentos de irrigação foram iniciados quando as plantas apresentavam a segunda folha totalmente desenvolvida. Quanto ao milho, os tratamentos de irrigação foram iniciados quando as plantas apresentaram a segunda folha totalmente desenvolvida. A irrigação foi

efetuada com base nas medições diárias do conteúdo de água do solo por gravimetria, fazendo-se uso de uma balança de precisão. Antes da aplicação dos tratamentos de irrigação, todos os vasos receberam a mesma lâmina de irrigação para que o suprimento hídrico inicial no solo se encontre próximo da ou na capacidade de vaso. Para definição das relações Ca:Mg no solo, levou-se em conta o resultado da análise química de solo acondicionado no interior dos vasos e a necessidade de adição de CaCO_3 e MgCO_3 ao solo em função dos níveis de relação Ca:Mg no solo previamente estabelecidos.

4.3 ANÁLISE QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA DO SOLO E INCUBAÇÃO

Para avaliar o efeito de diferentes relações Ca:Mg sobre a resposta biológica de soja, cevada e milho, o solo foi submetido ao processo de incubação antes da semeadura. Assim, misturou-se o solo seco com os reagentes analíticos CaCO_3 (p.a.) e MgCO_3 (p.a.) para que as diferentes relações Ca:Mg propostas nos experimentos fossem adotadas.

Após o processo de coleta, peneiramento e homogeneização do solo, uma amostra foi coletada para análise química e granulométrica (Tabelas 1, 2 e 3). A análise química tinha como finalidade determinar as quantidades de CaCO_3 e MgCO_3 a serem misturadas no solo de acordo com a relação Ca:Mg, bem como o cálculo da quantidade de fertilizantes a ser aplicada.

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de soja sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

pH (CaCl ₂)	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC (pH 7,0)	
----- cmol _c dm ⁻³ -----							
4,2	8,89	1,6	1,3	0,3	0,14	10,63	
P	C	MO	Areia	Silte	Argila	V	M
mg dm ⁻³	----- g dm ⁻³ -----		----- g kg ⁻¹ -----				% -----
20,5	18,5	31,8	708,1	109,9	182,0	16	48

CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; P = fósforo extraído com Melich-1); C = carbono (Walkley-Black); MO = matéria orgânica; V e m = saturação por bases e por alumínio, respectivamente.
Fonte: O autor

O preparo do solo para o processo de incubação foi iniciado com a mistura do solo com os reagentes analíticos CaCO_3 e MgCO_3 . Para a incorporação desses reagentes analíticos na cultura da soja, levou-se em consideração as seguintes relações Ca:Mg: a) 1:1 – 10,98 g de CaCO_3 e 12,78 g de MgCO_3 ; b) 3:1 – 19,31 g de

CaCO₃ e 5,89 g de MgCO₃; c) 6:1 – 22,91 g de CaCO₃ e 2,76 g de MgCO₃; d) 9:1 – 24,30 g de CaCO₃ e 1,59 g de MgCO₃ para 9 kg de solo seco em cada vaso.

Tabela 2 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

pH (CaCl ₂)	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC (pH 7,0)	
----- cmol _c dm ⁻³ -----							
4,5	5,61	0,5	1,4	0,4	0,06	7,47	
P	C	MO	Areia	Silte	Argila	V	M
mg dm ⁻³	----- g dm ⁻³ -----		----- g kg ⁻¹ -----			----- % -----	
41,7	14,0	24,1	803,6	60,8	135,6	25	21

CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; P = fósforo extraído com Melich-1; C = carbono (Walkley-Black); MO = matéria orgânica; V e m = saturação por bases e por alumínio, respectivamente.
Fonte: O autor

Para a cultura da cevada, as quantidades de reagentes utilizadas na incubação do solo foram as seguintes: a) relação 1:1 – 13,95 g de CaCO₃ e 19,26 g de MgCO₃; b) relação 3:1 – 27,23 g de CaCO₃ e 8,13 g de MgCO₃; c) relação 6:1 – 32,94 g de CaCO₃ e 3,33 g de MgCO₃; d) relação 9:1 – 35,19 g de CaCO₃ e 1,44 g de MgCO₃ para 18 kg de solo seco em cada vaso.

Tabela 3 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

pH (CaCl ₂)	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC (pH 7,0)	
----- cmol _c dm ⁻³ -----							
3,8	8,33	1,7	0,08	0,05	0,05	8,61	
P	C	MO	Areia	Silte	Argila	V	M
mg dm ⁻³	----- g dm ⁻³ -----		----- g kg ⁻¹ -----			----- % -----	
3,33	10,7	18,4	765,8	69,4	164,8	2,1	90

CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; P = fósforo extraído com Melich-1; C = carbono (Walkley-Black); MO = matéria orgânica; V e m = saturação por bases e por alumínio, respectivamente.
Fonte: O autor

Na cultura do milho, os reagentes analíticos CaCO₃ e MgCO₃ foram utilizados nas seguintes proporções: a) relação 1:1 – 13,50 g de CaCO₃ e 11,34 g de MgCO₃; b) relação 3:1 – 20,30 g de CaCO₃ e 5,67 g de MgCO₃; c) relação 6:1 – 23,22 g de CaCO₃ e 3,24 g de MgCO₃; d) relação 9:1 – 24,34 g de CaCO₃ e 2,26 g de MgCO₃ para 9 kg de solo seco em cada vaso.

A mistura do solo com os reagentes analíticos CaCO₃ e MgCO₃ foi realizada com o auxílio de sacos plásticos. Após o processo de mistura, o solo incorporado com os reagentes analíticos foi acondicionado nos vasos. Em seguida, os vasos foram

irrigados até 80% da capacidade de vaso e mantido nessa umidade durante o período de 60 dias por meio de pesagens diárias.

4.4 MANEJO DA IRRIGAÇÃO

A irrigação foi realizada manualmente por intermédio de regadores com o intuito de mensurar os diferentes níveis de suprimento de água no solo. A variação de peso do volume de controle (solo + plantas cultivadas no vaso) é diretamente proporcional à quantidade de água perdida para atmosfera do ambiente protegido sob o qual as plantas de soja, cevada e milho se desenvolveram. Assim, uma balança de precisão foi instalada no ambiente experimental para a determinação da demanda climática ideal de água das culturas em estudo (ET_m).

Para que o suprimento de água no volume de controle fosse adequado de modo a estabelecer a condição hídrica que possibilitasse a ocorrência da ET_m, o conteúdo de água no solo deve estar próximo da ou na capacidade de campo. Sob condições de ambiente controlado, essa capacidade de campo é denominada de capacidade de vaso (Casaroli; Lier, 2008), a qual se dá quando cessa o movimento descendente da água gravitacional no perfil do solo acondicionado nos vasos.

Para facilitar a percolação da água gravitacional no perfil do solo, os vasos foram preenchidos contando com uma camada de brita número 2 e areia grossa disposta logo abaixo do solo peneirado e acondicionado no interior dos vasos. Assim, 1 kg de brita número 2 e 800 g de areia grossa para o cultivo da soja e 1,4 kg de brita número 2 e 1,1 kg de areia grossa para o cultivo de cevada e de milho em associação com a deposição de uma manta geotêxtil foram considerados como valores apropriados para assegurar suprimento hídrico que levasse à obtenção de ET_m.

A determinação da ET_m pode ser realizada por meio de gravimetria e medidas evaporimétricas (baseadas na evaporação lida no tanque classe A – ECA). Para as medidas realizadas por gravimetria, a massa dos vasos foi determinada sob situação de suprimento adequado de água no solo (ou seja, conteúdo de água no solo próximo da ou na capacidade de vaso). Com o passar do tempo (depois de um período de três dias), o solo sai da capacidade de vaso em decorrência da DEA vigente no ambiente protegido, devendo no final desse período a massa do vaso ser pesada novamente. A diferença de massa do conjunto solo-planta entre o momento em que o solo atingiu a capacidade de vaso (dia 1) e o final do período de três dias a partir do qual o solo

saiu da condição de capacidade de vaso (dia 4) corresponde a lâmina ideal de água aplicada nos vasos – ETm. Os tratamentos de suprimento de água no solo foram estabelecidos em função de diferentes frações de ETm, ou seja, 60%, 80%, 100% e 120% de ETm.

Para as medidas de ECA (Equação 1), o coeficiente do tanque classe A (Kp) é de 0,72 para ambiente protegido (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

$$ET_o = ECA K_p \quad (1)$$

em que:

ET_o = evapotranspiração referência (mm dia⁻¹);

ECA = evaporação lida no tanque classe A (mm dia⁻¹);

K_p = coeficiente do tanque classe A (0,72);

A partir das medidas evaporimétricas efetuadas pelo parafuso micrométrico de um tanque classe A, pode-se calcular a evapotranspiração potencial ou de referência (ET_o). Esta variável unicamente meteorológica representa a demanda evaporativa da atmosfera (DEA) do ambiente agrícola estudado, a qual condiciona a tomada de água e a absorção de nutrientes minerais por parte das raízes das plantas. O coeficiente de cultura (K_c) foi determinado experimentalmente para as culturas estudadas (Equação 2) sob posse do conhecimento de ETm obtida via gravimetria.

$$K_c = \frac{ET_m}{ET_o} \quad (2)$$

em que:

K_c = coeficiente de cultura ou consumo hídrico relativo;

ET_m = evapotranspiração máxima da cultura (mm dia⁻¹);

ET_o = evapotranspiração potencial ou de referência (mm dia⁻¹).

4.5 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DA SOJA

Para a cultura da soja foram utilizados 96 vasos de 12 L (boca 27 cm, altura 23,5 cm e base 23,5 cm) preenchidos com solo peneirado. Em cada vaso que compôs a unidade experimental cultivaram-se duas plantas, a partir das quais foram

identificados e quantificados os efeitos de diferentes níveis de suprimento de água no solo e relações Ca:Mg sobre as respostas nutricionais, fisiológicas e fitotécnicas de cada um dos genótipos de soja. Os cultivares utilizados durante o experimento foram IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO.

Na condução do experimento optou-se pela escolha de dois genótipos com ciclos de maturação semelhantes e algumas características distintas. IAC Foscarin-31 é um cultivar convencional indicado para áreas localizadas nos estados centrais do Brasil, com altura de plantas de 90 a 120 cm e massa de mil grãos de 130 g. Enquanto, BMX Zeus IPRO é um cultivar transgênico recomendado para a região Sul do Brasil, possuindo como características altura de plantas de 70 a 90 cm e massa de mil grãos de 209 g, além de apresentar resistência ao acamamento e alta produtividade.

A soja foi semeada manualmente em 31/01/2022, após o fim do período de incubação, colocando-se oito sementes por vaso dispostas ao lado do sulco central de adubação. Após a emissão do primeiro trifólio, realizou-se o desbaste deixando-se duas plantas por vaso - prática necessária para promover maior adequação de espaço pelas plantas com vistas à mitigação da competição intraespecífica durante o subperíodo de desenvolvimento vegetativo da soja. A adubação foi realizada com 7,2 g da formulação 3-17-00 (N-P₂O₅-K₂O) no sulco central do vaso pouco antes da semeadura e 2,5 g de KCl na superfície após a semeadura, seguida de adição de água.

Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e tratadas com o fungicida Carbendazim e os inseticidas Imidacloprido e Fipronil para os cultivares IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. No transcorrer do desenvolvimento das plantas, realizou-se tratamento fitossanitário para controlar a proliferação de ácaros, tripes e oídio. O controle de infestação de plantas daninhas foi efetuado manualmente durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A colheita foi planejada para ser procedida no dia 10/05/2022, logo após a cultura da soja ter atingido a maturidade fisiológica. As plantas de soja foram cortadas rente ao solo para avaliação dos componentes de rendimento, da matéria seca e dos parâmetros nutricionais (extração de Ca, Mg e K).

4.6 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DA CEVADA

No cultivo da cevada foram utilizados 48 vasos de 20 L (boca 33 cm, altura 28,5 cm e base 28 cm) preenchidos com solo peneirado. Cada unidade experimental foi composta por seis plantas, a partir da qual foram avaliados os impactos de diferentes níveis de suprimento de água e de relações Ca:Mg no solo sobre as respostas nutricionais, fisiológicas e fitotécnicas do cereal de inverno. Para a condução do experimento escolheu-se o cultivar de cevada cervejeira Imperatriz de alta produtividade e moderadamente resistente ao acamamento.

A semeadura da cevada foi realizada no dia 12/05/2023, após o período de incubação do solo. A semeadura foi manual, colocando-se 12 sementes por vaso ao lado do sulco central de adubação. Após a emissão da primeira folha, foi efetuado o desbaste deixando seis plantas por vaso. A adubação foi realizada com 3,02 g da formulação 3-17-00 (N-P₂O₅-K₂O) e 0,37 g de ureia no sulco central do vaso pouco antes da semeadura, e 0,86 g de KCl na superfície após a semeadura, seguida da irrigação. Uma adubação de cobertura nitrogenada foi realizada aos 15 dias após a emergência (DAE) com 1,52 g de ureia para cada vaso.

Antes da semeadura as sementes de cevada foram tratadas com os fungicidas Piraclostrobina e Tiofanato Metílico e o inseticida Fipronil. Durante o desenvolvimento das plantas, o tratamento fitossanitário foi efetuado para o controle de mancha reticulada e oídio. O controle de infestação de plantas daninhas foi realizado de forma manual durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A colheita foi efetuada no dia 27/10/2023, logo após a cultura da cevada ter atingido a maturidade fisiológica. As plantas de cevada foram cortadas rente ao solo para avaliação dos componentes de rendimento, da matéria seca e dos parâmetros nutricionais (extração de Ca, Mg e K).

4.7 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CULTIVO DO MILHO

O cultivo do milho foi efetuado com 48 vasos de 12 L (boca 27 cm, altura 23,5 cm e base 23,5 cm) preenchidos com solo peneirado. Cada unidade experimental foi representada por um vaso composto de duas plantas de milho. Durante a condução do experimento o híbrido utilizado foi K7 500 VIP3. Esse híbrido apresenta altura de plantas de 225 a 250 cm e massa de mil grãos de 350 a 400 g, além de alto rendimento

e uso para produção de grãos e silagem. Para cada unidade experimental foram avaliados os impactos de diferentes níveis de suprimento de água e de relações Ca:Mg no solo sobre as respostas nutricionais, fisiológicas e fitotécnicas das plantas de milho em estudo.

A semeadura do milho foi realizada no dia 30/09/2023, após o período de incubação do solo ser finalizado. Na semeadura foram colocadas oito sementes em cada vaso. Após a emissão da segunda folha, foi efetuado o desbaste deixando duas plantas em cada vaso. Antes da semeadura procedeu-se a adubação, incorporando ao solo 7,92 g de fosfato monoamônico (MAP), 2,7 g de KCl e 0,504 g de Sulfurgran (90% de S elementar). Também foram aplicados micronutrientes no solo, incorporando 224 mg de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 198 mg de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 162 mg de $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 51 mg de H_3BO_3 e 53 mg de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Uma adubação de cobertura nitrogenada foi realizada 30 DAE com 2,28 g de ureia em cada vaso.

A colheita da parte aérea foi efetuada no dia 14/12/2023, logo após a emissão de pendão do milho. As plantas de milho foram cortadas rente ao solo para avaliação dos componentes fitotécnicos, da matéria fresca e seca e dos parâmetros nutricionais (extração de Ca, Mg e K).

4.8 VARIÁVEIS-RESPOSTA DAS PLANTAS AVALIADAS NOS EXPERIMENTOS

4.8.1 Parâmetros Biológicos da Soja

No final do ciclo de desenvolvimento das plantas de soja foram medidos os seguintes parâmetros biológicos da cultura em ambiente protegido: altura de planta, altura de inserção de primeira vagem, número total de nós e número de nós viáveis, número de vagens por planta total e viáveis, número de grãos por vagem, número de grãos por planta, massa de grãos por planta, e massa de mil grãos.

A altura de planta foi determinada medindo-se a distância vertical entre a superfície do solo e o ponto de inserção da última folha, fazendo-se uso de uma trena graduada. Para a determinação da altura de inserção de primeira vagem foi considerada a máxima distância vertical entre a superfície do solo e a primeira vagem mais próxima do solo. Determinou-se o número de nós viáveis e não viáveis, considerando-se como nó viável aquele a partir do qual se observou efetivamente a emissão de, pelo menos, uma vagem.

O número de vagens por planta (NVP) foi quantificado separando-se as vagens viáveis das não viáveis. Foi considerada como vagem viável aquela que produziu, pelo menos, um grão. O número de grãos por planta (NGP) foi determinado por contagem manual. 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.

Com vistas à determinação da massa de grãos por planta (MGP), foi utilizada uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS 2000C com um desvio de 0,01 g e erro de 0,1 g. Posteriormente, foi determinada a umidade pelo método padrão de estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 h (Brasil, 2009). A partir da umidade obtida, a massa de grãos foi ajustada para 13% de umidade em peso (Equação 3).

A massa de mil grãos (MMG) foi calculada através da equação 4, após ter sido considerado o fator de correção para umidade.

$$\text{MGP} = \frac{100 - \text{PG}}{100 - 13} \cdot \text{mg} \quad (3)$$

em que:

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).

$$\text{MMG} = \frac{\text{MGP} \cdot 1000}{\text{NG}} \quad (4)$$

em que:

MMG = massa de mil grãos (g);

NG = número grãos.

4.8.2 Parâmetros Biológicos da Cevada

Na cevada foram avaliados os seguintes parâmetros biológicos no final do ciclo de desenvolvimento das plantas: altura de planta, número de perfilhos, número de espiga por planta, número de grãos por espiga, número de grãos por planta, massa de grãos por planta e massa de mil grãos.

A altura de planta foi determinada medindo-se a distância vertical entre a superfície do solo e o ponto de inserção da espiga mais alta por intermédio de uma

trena graduada. O número de perfilhos, o número de espiga por planta (NEP) e o NGP foram determinados pela contagem manual. O número de grãos por espiga (NGE) foi obtido pela razão entre o número de grãos produzido por uma dada planta e o número de espiga dessa mesma planta.

Para determinar a MGP utilizou-se uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS 2000C com um desvio de 0,01 g e erro de 0,1 g. Em seguida, foi obtida a umidade pelo método padrão de estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 h (Brasil, 2009). Com a umidade obtida, a massa de grãos foi ajustada para 13% de umidade em peso (Equação 3).

A MMG foi aferida mediante a equação 4, após ter sido considerado o fator de correção para umidade.

4.8.3 Parâmetros Biológicos do Milho

Para o milho, foram avaliados os seguintes parâmetros biológicos da cultura: altura de planta, diâmetro de colmo, massa fresca de parte aérea, massa seca de parte aérea, massa seca de raiz e relação raiz e parte aérea.

A altura de planta foi determinada medindo-se a distância vertical entre a superfície do solo e o ponto de inserção da última folha por intermédio de uma trena graduada. O diâmetro de colmo foi medido por um paquímetro, aferindo-se o maior e o menor diâmetro e em seguida determinando a sua média.

Com relação a massa fresca de parte aérea (MFPA), essa variável foi determinada logo após a colheita das plantas através de uma balança de precisão. Após a determinação da MFPA, as plantas de milho foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por um período de 72h. Em seguida as plantas foram retiradas da estufa e determinou-se a sua massa seca de parte aérea (MSPA) por intermédio de uma balança de precisão da marca Marte, modelo AS 2000C com um desvio de 0,01 g e erro de 0,1 g.

Para a determinação da massa seca de raiz (MSR), as raízes foram separadas do solo e lavadas com o auxílio de uma peneira de 0,84 mm. Posteriormente foi retirado o excesso de água das raízes, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C durante 72h. A relação raiz e parte aérea (RRPA) foi determinada pela razão entre a MSPA e a MSR (Equação 5).

$$RRPA = \frac{MSPA}{MSR} \quad (5)$$

4.8.4 Parâmetros Ecofisiológicos das Culturas

Os parâmetros ecofisiológicos foram monitorados por intermédio do aparelho analisador portátil de fotossíntese, da marca LI-COR modelo 6400-XT, denominado IRGA (Infrared Gas Analyzer – Analisador Infravermelho de Gases). Na cultura da soja, estes parâmetros teriam sido mensurados entre os estádios V6 e R2 e na cevada entre as fases de alongação e florescimento. Porém, o aparelho portátil IRGA não estava em condições de uso por problemas de avaria durante a condução do experimento com as referidas culturas - aspecto que impossibilitou a obtenção de resultados relativos ao impacto dos fatores estudados sobre as respostas fisiológicas das plantas. Para a cultura do milho, no entanto, foi avaliado o comportamento de parâmetros ecofisiológicos sobre o desenvolvimento das plantas entre os estádios V6 e R1. As avaliações foram realizadas no período da manhã entre 8:00 e 10:30.

A análise dos parâmetros ecofisiológicos foi realizada com a medição da parte central de uma folha totalmente desenvolvida. Durante as avaliações, com a finalidade de padronizar as medidas, selecionou-se a mesma folha de planta de milho durante o dia em que as aferições foram efetuadas. Os parâmetros ecofisiológicos monitorados em nosso estudo pelo IRGA foram: fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (G_s , $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração de carbono intercelular (C_i , $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) e transpiração foliar (E , $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). 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 6 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 por intermédio da equação 7.

$$EUA = \frac{A}{E} \quad (6)$$

$$ECi = \frac{A}{C_i} \quad (7)$$

4.8.5 Atributos Químicos do Solo

Após o processo de colheita de cada cultura, uma amostra simples de solo foi coletada em cada vaso. Essa amostragem teve como finalidade caracterizar os atributos químicos do solo, com vistas à avaliação dos efeitos das alterações químicas do solo em diferentes status de água sobre a absorção de Ca, Mg e K pelas plantas. A caracterização dos atributos químicos do solo foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo da UEPG.

Os teores de Ca e de Mg trocáveis no solo foram extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹. A determinação dos teores de Ca e Mg trocáveis foi realizada por meio de titulação com solução de EDTA 0,025 N. O K trocável foi extraído com a solução de Mehlich-1 e sua determinação foi realizada por fotometria de chama. As análises de Ca, Mg e K trocáveis no solo foram realizadas de acordo com os métodos descritos em Pavan *et al.* (1992).

4.8.6 Análise Química da Parte Aérea

Após o ciclo de desenvolvimento da cultura, as plantas foram cortadas rente à superfície do solo, separando-se a planta e os grãos. Em seguida os materiais foram acondicionados em saco de papel e colocados em estufa de circulação de ar à 60 °C por 72 h até atingirem massa constante. Posteriormente as plantas e o grãos foram moídos utilizando um moinho de facas tipo Willey e acondicionados em sacos plásticos. Essa avaliação teve o objetivo analisar os teores de Ca, Mg e K da planta e dos grãos separadamente em função do balanço catiônico e do status de água no solo.

Para análise nutricional, as amostras moídas de planta e de grãos foram submetidas ao processo de digestão nítrico-perclórica. Os teores de Ca e Mg da parte aérea foram determinados por espectrometria de absorção atômica e o de K foi determinado por fotometria de chama. Posteriormente foi obtida a extração de Ca, Mg e K de planta e grãos em função da massa seca. Em seguida foi determinado a extração total dos referidos nutrientes nas culturas da soja e da cevada pela soma da extração de planta e grãos.

4.9 ANÁLISES ESTATÍSTICAS APLICADAS AOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais coletados ao longo da estação de crescimento de cada cultura foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F , considerando-se o delineamento em blocos ao acaso, no esquema fatorial 4×4 , com três repetições (Tabela 4). Para verificar a normalidade das variâncias, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk. Quando não constatada a normalidade dos dados, estes foram transformados pelo fator de transformação Box-Cox descrito pela equação 8. Nos casos em que o teste F foi significativo ($P < 0,05$), os dados experimentais foram submetidos a análise de regressão para quantificar o efeito das quatro relações Ca:Mg no solo, bem como dos diferentes níveis de suprimento de água no solo sobre as variáveis-resposta das culturas conduzidas em ambiente protegido. Na cultura do milho, avaliou-se também o efeito do estágio fenológico nos parâmetros ecofisiológicos. Para essa avaliação, considerou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas foram constituídas pelos níveis de água no solo e as sub-parcelas pelas etapas fenológicas (V6, V8, V10 e R1). A Tabela 5 ilustra o esquema da análise de variância com aplicação de teste F com intuito de avaliar o efeito de status de água no solo e o estágio fenológico da cultura nas respostas ecofisiológicas das plantas. As análises estatísticas foram realizadas por intermédio do *software* R (R Core Team, 2022).

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \ln(X_i), & \text{se } \lambda = 0, \\ \frac{X_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{se } \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

em que:

X_i = dados originais;

λ = parâmetro de transformação;

Y_i = valor transformado

Tabela 4 – Esquema da análise de variância com aplicação de teste F para as variáveis avaliadas nos experimentos de soja, cevada e milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade
Bloco	2
Água (W)	3
Ca:Mg (R)	3
W x R	9
Erro Experimental	30
Total	47

Fonte: O autor

Tabela 5 – Esquema da análise de variância com aplicação de teste F para as variáveis avaliadas na cultura do milho em função de status de água no solo e estágio fenológico sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade
Água (W)	3
Bloco	2
Erro a	6
Época	3
W x E	9
Erro b	24
Total	47

Fonte: O autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

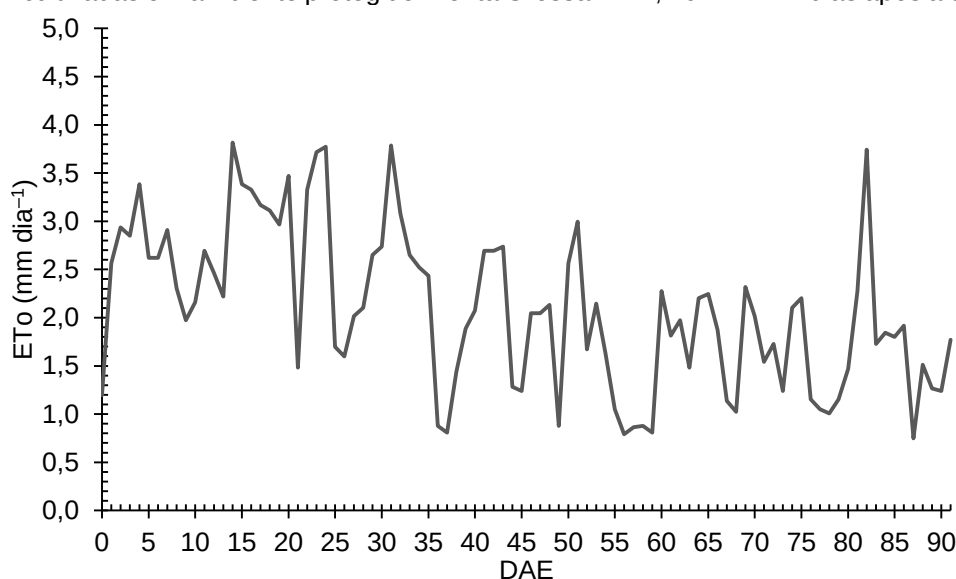
5.1 CULTURA DA SOJA

5.1.1 Condições climáticas

Os dados meteorológicos relativos às temperaturas máxima, mínima e média e umidade relativa do ar no interior da casa de vegetação que seriam coletados durante a estação de crescimento das plantas de soja não foram monitorados devidamente por problemas de funcionamento adequado dos sensores de temperatura e umidade. No entanto, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada durante todo o ciclo da cultura para que fosse possível ter uma ideia da DEA do ambiente agrícola intencionalmente modificado por ocasião da instalação e condução do experimento.

Na Figura 3 são ilustradas as variações de ET_o ao longo da estação de crescimento da soja cultivada sob condições de ambiente protegido no ano de 2022 em Ponta Grossa, PR. A ET_o total do período foi de 192,7 mm, variando de 3,82 mm dia⁻¹ em 19/02/2022 a 0,75 mm dia⁻¹ em 05/05/2022, coincidindo com as épocas de maiores e menores temperaturas do ambiente, respectivamente, durante o cultivo 1 (cultura da soja).

Figura 3 – Valores médios diários das taxas de evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de soja cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.

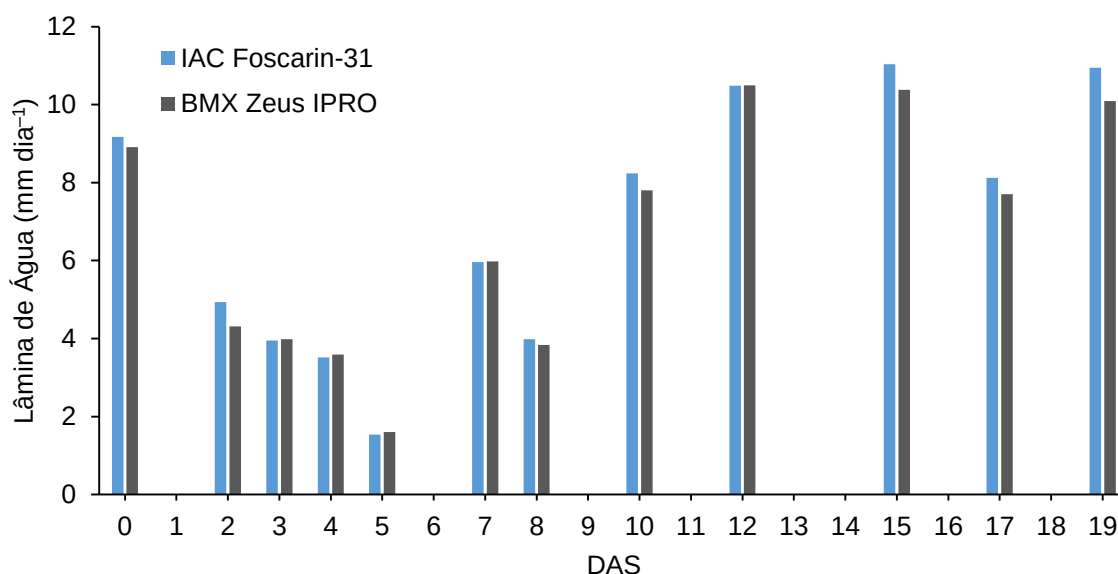


Fonte: O autor

5.1.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo

A Figura 4 ilustra a lâmina de água média que foi adotada nos vasos antes da definição dos tratamentos de água no solo. Todos os vasos receberam a quantidade de água necessária para manter o conteúdo de água no solo na ou próximo da capacidade de vaso inicialmente, tendo sido a lâmina média total correspondente a 81,9 mm para o cultivar IAC Foscarin-31 e 78,7 mm para o cultivar BMX Zeus IPRO durante este período. A maior lâmina de água recebida pelo cultivar IAC-Foscarin-31 está relacionada a maior área foliar apresentada. Após aplicação dos tratamentos de água nos seus diferentes níveis, cada vaso recebeu frações específicas da lâmina ideal de água de irrigação em conformidade com os tratamentos propostos no experimento 1.

Figura 4 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de soja cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.



Fonte: O autor

A Figura 5 discrimina as diferentes lâminas totais de irrigação utilizadas após a aplicação dos tratamentos referentes ao suprimento hídrico do solo. Os vasos com o cultivar IAC Foscarin-31 receberam as seguintes lâminas de irrigação: 566,5; 475,0; 380,5 e 284,4 mm, respectivamente, para 120, 100, 80 e 60% da ET_m. Nos vasos com o cultivar BMX Zeus IPRO foram aplicadas para os quatro níveis de água no solo,

considerando-se a ordem decrescente de fração da ET_m, as lâminas totais de água de 442,1; 369,9; 294,0 e 220,1 mm, respectivamente.

O número de eventos de irrigação foi o mesmo para todos os tratamentos pertinentes ao suprimento de água no solo. De forma similar, os eventos de irrigação foram estipulados no mesmo dia para todos os vasos. A quantidade de água aplicada no solo foi diferente entre tratamentos, tendo sido estabelecida em função de distintas frações de ET_m obtida por meio da pesagem dos vasos.

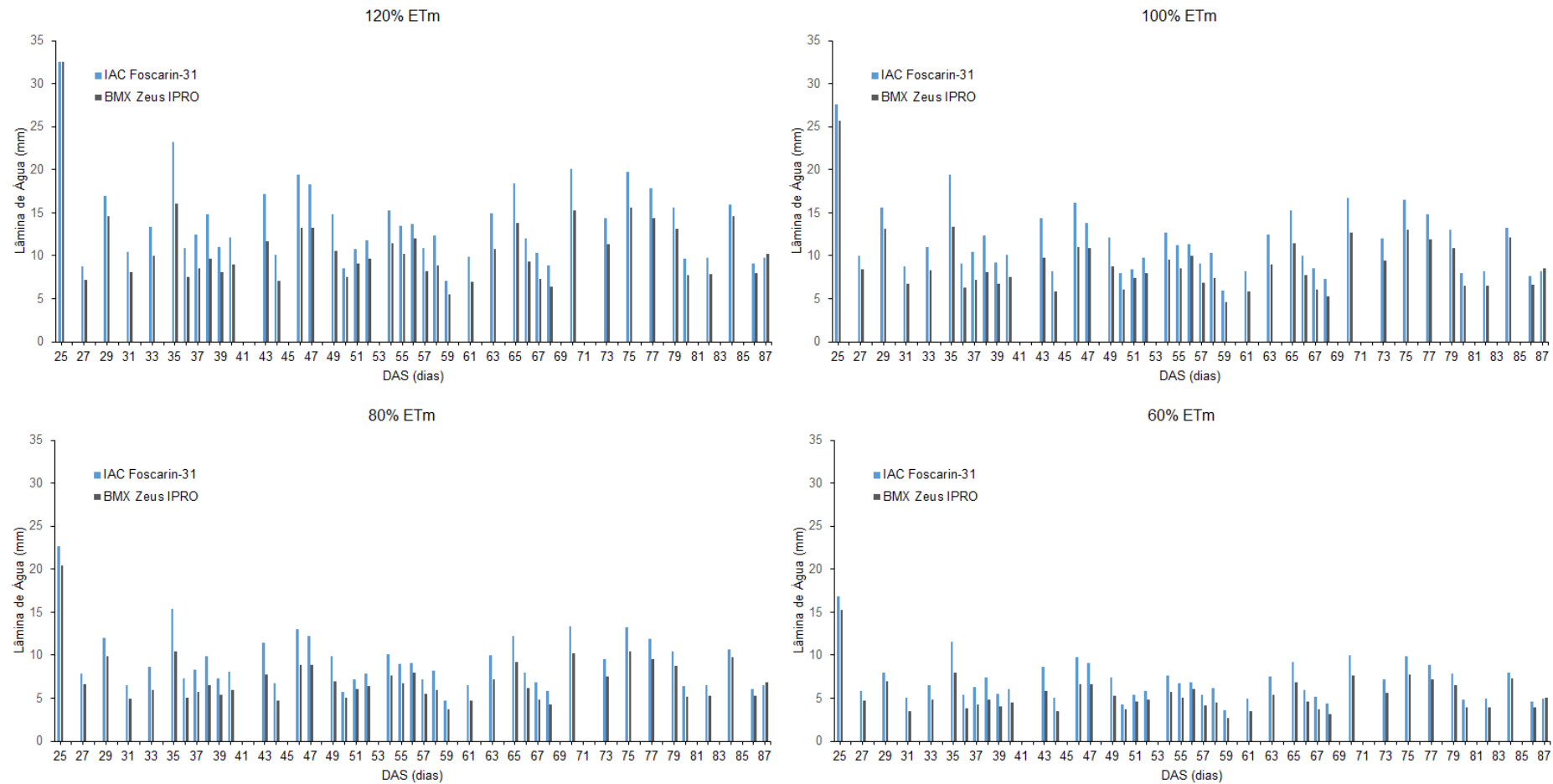
A Figura 6 descreve o consumo hídrico médio diário dos vasos antes da aplicação dos tratamentos de água no solo para cada cultivar de soja. Nos primeiros dias após a emergência verificou-se aumento no consumo hídrico que praticamente se manteve estável até o momento de aplicação dos tratamentos de água no solo. O consumo hídrico foi maior aos 14 DAE com valores médios de 2,32 e 2,11 mm para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. Essas taxas de perda de água se deram em função das altas temperaturas do ar registradas nesse dia.

Os valores médios do consumo hídrico diário foram de 1,61 e 1,55 mm para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO apresentaram consumo hídrico acumulado no subperíodo de estabelecimento da cultura da soja de 27,0 e 25,4 mm, respectivamente.

Na Figura 7 é demonstrado o consumo hídrico médio das plantas de soja após aplicação dos tratamentos de água. Esse consumo hídrico foi observado sob condições de suprimento adequado de água no solo. De acordo com a Figura 7, verificou-se grande variação no consumo hídrico decorrente das condições climáticas no interior da casa de vegetação durante o referido subperíodo de desenvolvimento. As maiores taxas de consumo de água foram atingidas durante as fases de florescimento e enchimento de grãos. Segundo Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009), o suprimento adequado de água no solo é muito importante para o cultivo da soja, principalmente durante as etapas mais críticas à falta de água, tais como germinação-emergência e floração-enchimento de grãos.

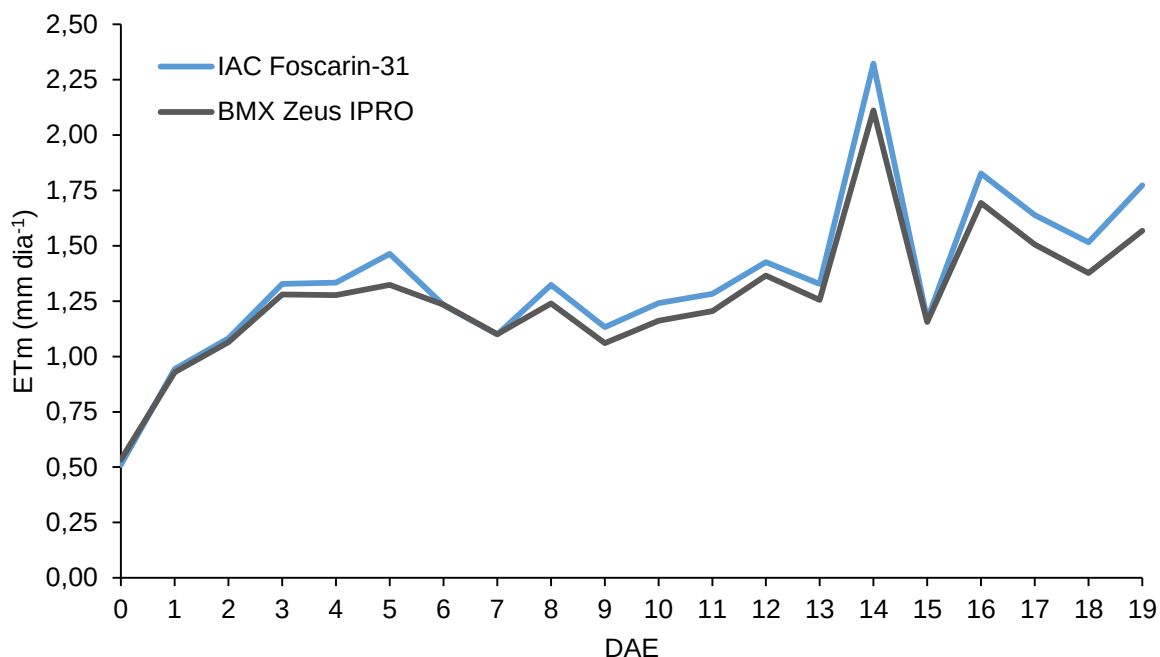
Os cultivares IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO apresentaram consumo hídrico acumulado de 148,6 e 118,9 mm, respectivamente. Os valores médios do consumo hídrico diário foram de 2,19 e 1,75 mm para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. Os maiores valores de consumo hídrico ideal diário do cultivar IAC Foscarin-31 estão relacionados ao seu maior índice de área foliar.

Figura 5 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento de dois cultivares de soja em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.



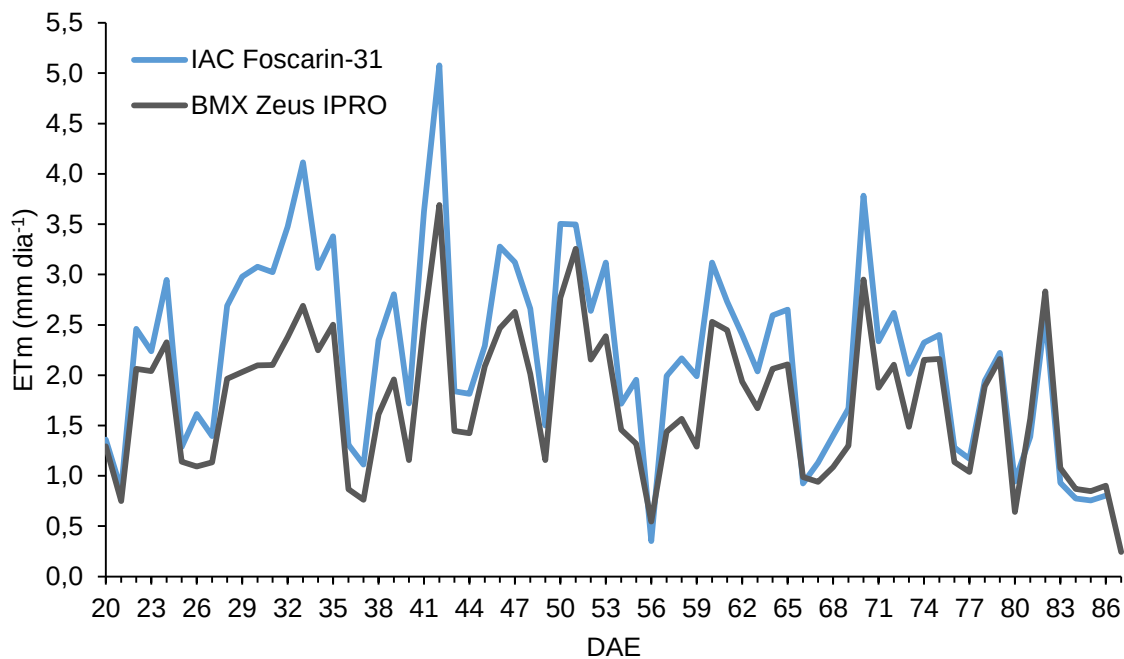
Fonte: O autor

Figura 6 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura da soja sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

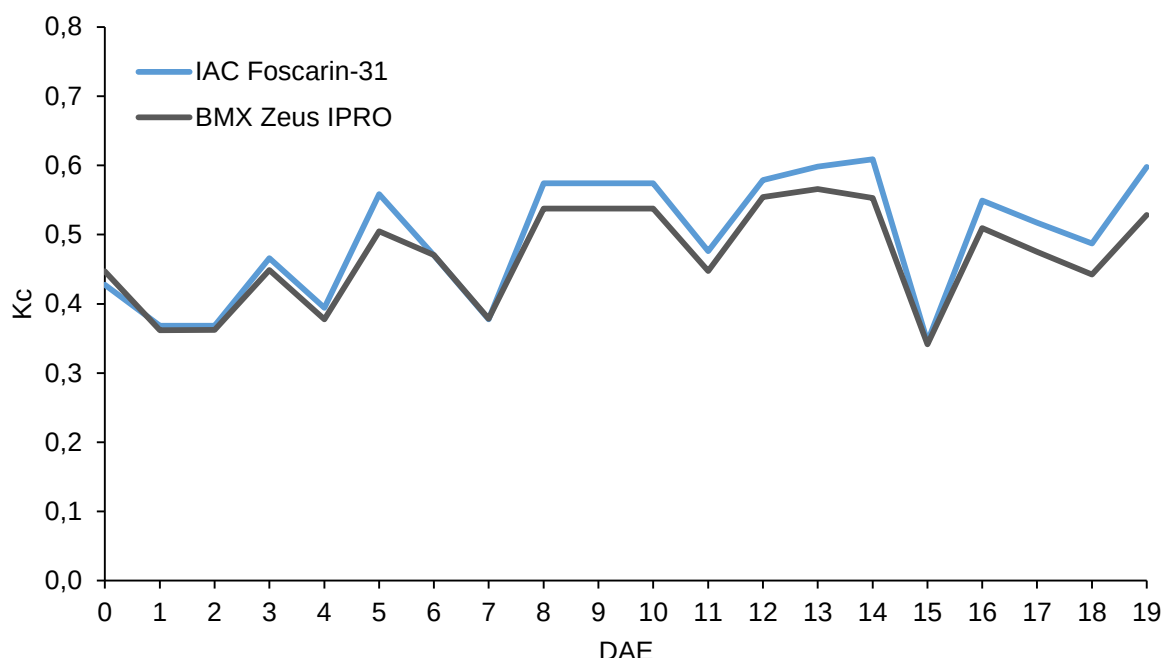
Figura 7 – Consumo hídrico ideal diário (ETm) dos cultivares IAC Foscari-31 e BMX Zeus IPRO desde o desenvolvimento vegetativo até a maturação das plantas de soja em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

O coeficiente de cultura ou consumo hídrico relativo (K_c) durante o início do desenvolvimento da cultura apresentou comportamento semelhante entre os dois cultivares neste período (Figura 8). Os valores de K_c do cultivar IAC Foscarin-31 foram ligeiramente mais elevados do que aqueles calculados para o cultivar BMX Zeus IPRO, pois a primeira contou com um índice de área foliar maior quando comparada com a segunda. O K_c teve uma variação de 0,34 a 0,61 para o cultivar IAC Foscarin-31 e de 0,34 a 0,57 para o cultivar BMX Zeus IPRO.

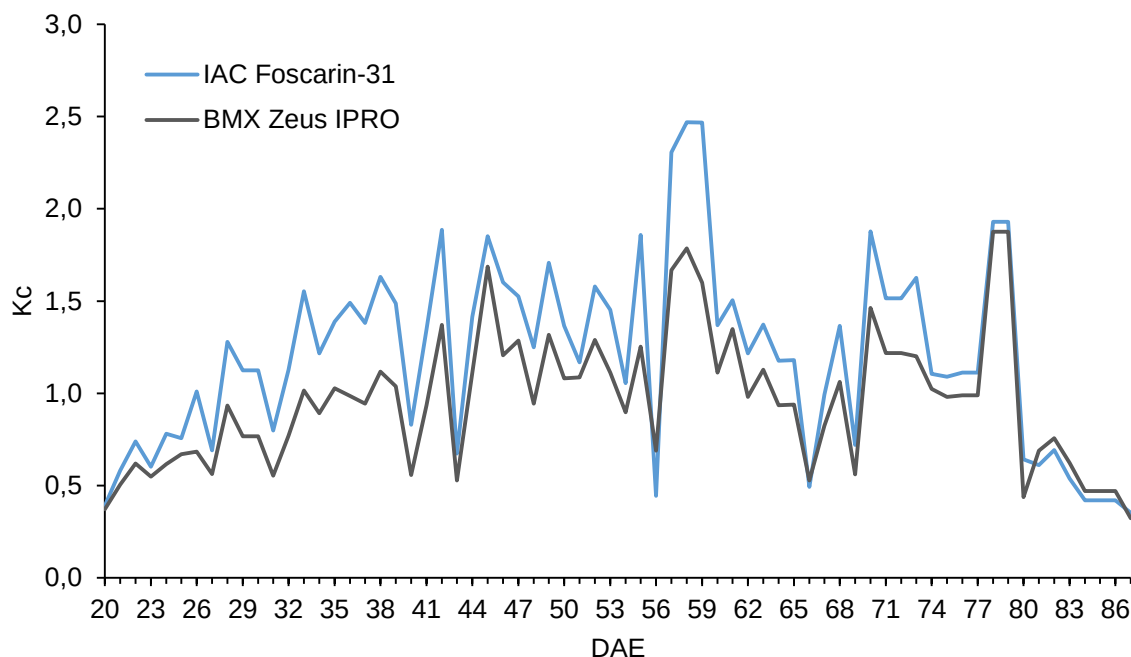
Figura 8 – Variação do consumo hídrico relativo (K_c) entre a semeadura, a germinação e a emergência de dois genótipos de soja cultivados em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Os valores diários de K_c determinados após aplicação dos tratamentos de água são demonstrados na Figura 9. Em geral, os valores de K_c para o cultivar IAC Foscarin-31 foram mais elevados devido ao maior índice de área foliar. Para ambos cultivares, os maiores valores de K_c foram observados durante o florescimento e o enchimento de grãos, fases de maior demanda hídrica da cultura, atingindo limiares de 2,47 e 1,88 para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. Na maturação, subperíodo que coincide com a época de queda das folhas, o valor de K_c declina na mesma proporção de depleção do índice de área foliar, tendo assumido magnitudes de 0,35 e 0,32 para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente.

Figura 9 – Variação do consumo hídrico relativo (Kc) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo e formação da produção de dois genótipos de soja cultivados em ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Mila, Akanda e Sarkar (2016) propuseram valores de Kc de 0,67, 1,46, 1,59 e 0,62 para a cultura da soja cultivada sob as condições climáticas locais de Bangladesh por intermédio do uso de microlisímetros, nos subperíodos de germinação, desenvolvimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos, e maturação, respectivamente. A literatura reporta que o consumo hídrico relativo das culturas anuais varia em função da espécie vegetal cultivada, do estágio fenológico da cultura com um resultado da variação do índice de área foliar e também em decorrência do genótipo utilizado, sempre assumindo valores máximos durante o subperíodo de formação da produção e mínimos na maturação.

5.1.3 Altura de plantas, inserção de primeira vagem e número de nós

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os parâmetros biométricos da cultura da soja para os cultivares IAC Foscari-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. A altura de plantas de soja do cultivar IAC Foscari-31 foi afetada significativamente pelos níveis de água no solo e pelas relações Ca:Mg (Tabela 6); entretanto, não foi observada interação entre esses dois fatores. Altura de plantas evidenciou tendência de incremento linear com o aumento do suprimento de água no solo (Figura 10). Os

valores máximo e mínimo foram de 97,5 cm e 76,1 cm para os níveis de suprimento hídrico de 120% e 60% da ET_m, respectivamente. No particular ao fator balanço de cátions no solo, a altura de plantas foi descrita por um modelo de regressão linear simples, com valores máximos e mínimos de 96,1 cm e 80,2 cm sob as proporções Ca:Mg 1:1 e 9:1, respectivamente (Figura 11).

Tabela 6 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para altura de plantas, altura de inserção de primeira vagem, número total de nós e número de nós viáveis em população de plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		Altura de Plantas	Inserção de 1º Vagem	Número de Nós	
				Total	Viáveis
Água (W)	3	1304,7847**	24,8194 ^{ns}	11,6528*	7,0479 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	623,3681*	5,3333 ^{ns}	4,7639 ^{ns}	11,4913*
W x R	9	233,9097 ^{ns}	11,3102 ^{ns}	2,6667 ^{ns}	6,8848 ^{ns}
C.V. (%)		15,26	23,11	14,48	19,29

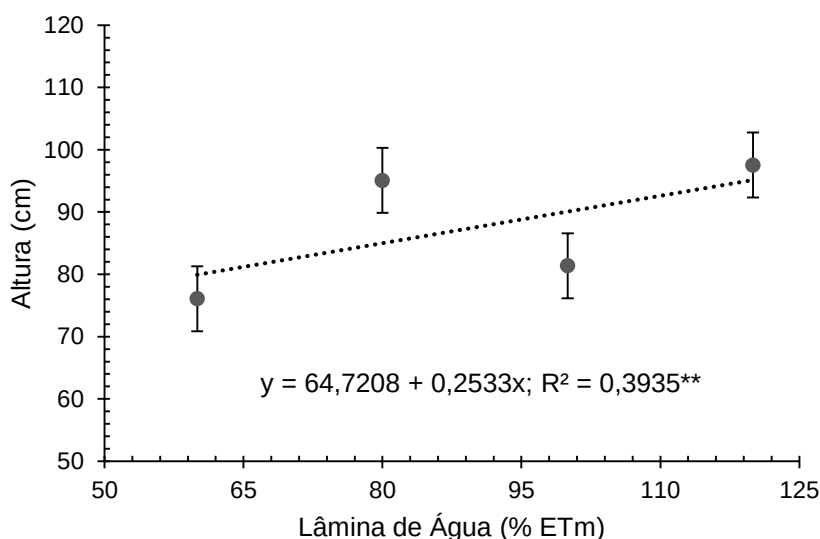
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

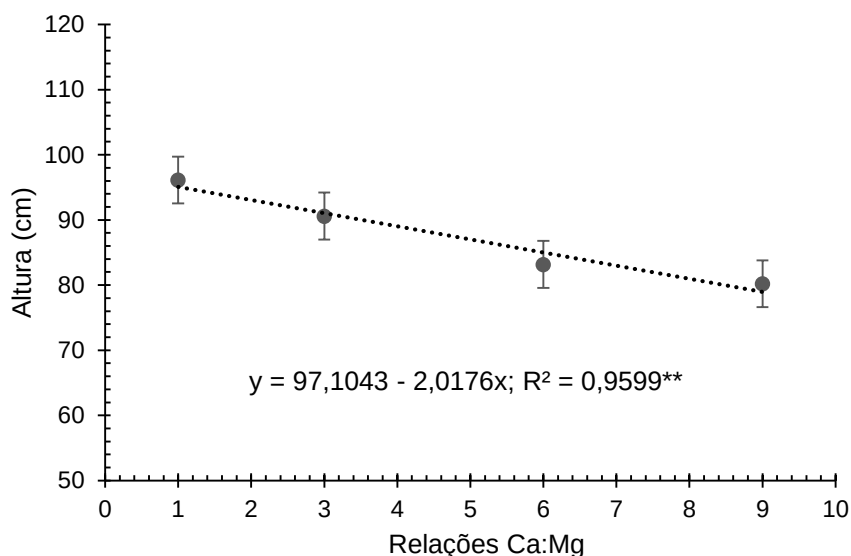
Fonte: O autor

Figura 10 – Altura de plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 11 – Altura de plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

No que diz respeito à altura de plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO, não se constatou efeito de relação Ca:Mg no solo, porém o status de água no solo afetou significativamente o desempenho fitotécnico do referido genótipo (Tabela 7). Não foi observado efeito significativo da interação entre status de água no solo e relação Ca:Mg no solo. Considerando altura de plantas em função do suprimento hídrico no solo, o desempenho fitotécnico do cultivar BMX Zeus IPRO foi descrito por um modelo de regressão linear simples. Os valores máximo e mínimo foram de 55,9 cm e 47,1 cm para os níveis de umidade do solo de 120% e 60% da ET_m, respectivamente (Figura 12).

Tabela 7 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para altura de plantas, altura de inserção de primeira vagem, número total de nós e número de nós viáveis em população de plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		Altura de Plantas	Inserção de 1ª Vagem	Número de Nós	
				Total	Viáveis
Água (W)	3	162,6667**	0,3523 ^{ns}	29,8663**	34,3890**
Ca:Mg (R)	3	2,7633 ^{ns}	0,7273 ^{ns}	2,3663 ^{ns}	3,3193 ^{ns}
W x R	9	8,0367 ^{ns}	1,2506 ^{ns}	2,6580 ^{ns}	3,4028 ^{ns}
C.V. (%)		9,13	14,61	10,75	13,45

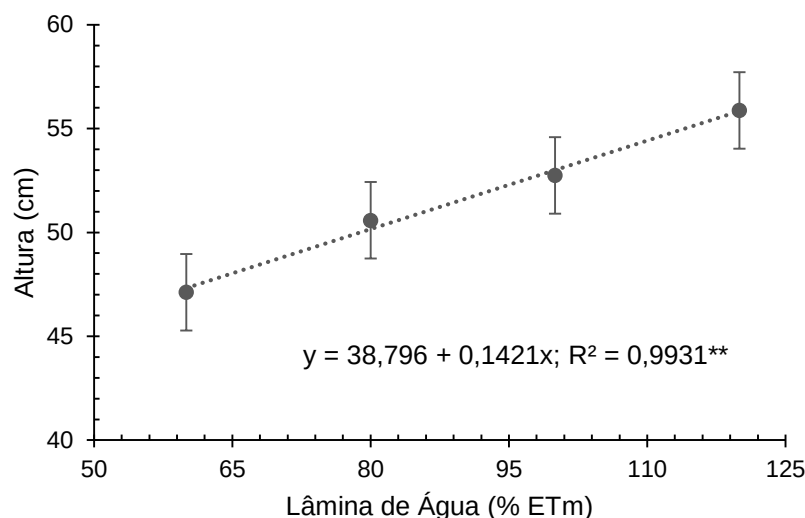
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 12 – Altura de plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO, em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Redução na altura de plantas também foi observada por Cassol (2017) em estudo que objetivou avaliar o efeito de déficit hídrico sobre as respostas biológicas de plantas de soja, cultivar Nidera 6209 RR, cultivadas em casa de vegetação com dispositivos de controle de umidade e temperatura do ar. O referido autor identificou redução na altura de plantas de soja submetidas ao déficit hídrico nos estádios fenológicos V6, R2 e R5 em comparação ao tratamento controle. Sob a influência do tratamento que confere déficit hídrico, a umidade do solo era mantida entre 30-40% da capacidade de vaso por 10 dias consecutivos.

Com objetivo de aferir o comportamento de plantas de soja sob o suprimento hídrico em distintas fases fenológicas, Gava *et al.* (2015) conduziram um experimento em ambiente protegido com a referida cultura semeada em lisímetros de drenagem. Os autores dividiram o ciclo da espécie nos seguintes subperíodos: Subperíodo 1 (S1) – Desenvolvimento Vegetativo (V2 a V12); Subperíodo 2 (S2) – Floração ao Início da Frutificação (R1 a R3); Subperíodo 3 (S3) – Completa Formação de Vagens à Formação da Produção (R4 a R6) e Subperíodo 4 (S4) – Maturação (R7 a R8). Os tratamentos basearam-se em três lâminas de irrigação: déficit (50% da ETm); excesso (150% da ETm) e irrigação plena (100% da ETm). Assim, a condução do experimento constituiu-se nos seguintes tratamentos: déficit no ciclo total (DCT), déficit em S1 (DS1), déficit em S2 (DS2), déficit em S3 (DS3), déficit em S4 (DS4), excesso no ciclo total (ECT), excesso em S1 (ES1), excesso em S2 (ES2), excesso em S3 (ES3), excesso em S4 (ES4) e

irrigação plena (IP). A altura de plantas apresentou impacto sob os níveis de irrigação, de forma que a referida variável em função do tratamento DCT foi inferior em comparação ao tratamento ES1, com valores máximo e mínimo de 126,5 e 104,8 cm, respectivamente.

Wijewardana *et al.* (2018) avaliaram a resposta biológica de dois cultivares de soja, Asgrow AG5332 e P5333RY, em função do status de água no solo sob as condições climáticas de Mississippi, EUA. Os dois cultivares de soja foram cultivados inicialmente em vasos ao ar livre e aos 41 DAS os vasos foram transferidos para câmaras de crescimento, sob incidência de luz solar, com controle de temperatura do ar e concentração de CO₂ e mediante aplicação de lâminas de irrigação correspondentes a 100, 80, 60, 40 e 20% da ET_m medida diariamente. Os referidos autores observaram redução de 24 e 22% na altura de plantas para os genótipos Asgrow AG5332 e P5333RY, respectivamente. A altura média das plantas de Asgrow AG5332 variou de 104 a 79 cm, enquanto que para a P5333RY a variação de altura foi de 86 a 67 cm.

Segundo Ries *et al.* (2012), as plantas tendem a reduzir o turgor celular em solos com restrição hídrica, o que diminui a condutância estomática e a expansão celular, limitando a fotossíntese e o crescimento das plantas.

Lange *et al.* (2021), examinando o efeito das relações Ca:Mg no solo de 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 e 6:1 sobre a altura de plantas do cultivar de soja TMG 132, observaram que as relações 5:1 e 6:1 resultaram em maior altura de planta em comparação às demais relações. As alturas variaram entre 59,3 cm, para a relação 5:1, e 54,8 cm, para a relação 2:1. Estudando o efeito das relações Ca:Mg 1:1, 2:1, 4:1, 6:1 e 8:1 sobre a referida variável-resposta de espécies forrageiras (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés, *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Stylozanthos* cv. Campo Grande), Guimarães Júnior *et al.* (2013) verificaram maior altura de plantas para espécies cultivadas em solo sob influência da relação Ca:Mg 2:1 em comparação à relação Ca:Mg 8:1. Marschner (1995) relata que a redução do desenvolvimento de plantas pode estar relacionada com o desequilíbrio de nutrientes à medida que a proporção Ca:Mg aumenta, limitando a absorção de Mg e K no solo devido ao excesso de Ca absorvido pelas plantas.

A altura de inserção de primeira vagem de soja do cultivar IAC Foscarin-31 não foi afetada significativamente pela relação Ca:Mg no solo e, nem tampouco, pelo status de água no solo (Tabela 6). O valor médio da altura de inserção de primeira vagem para esse cultivar foi de 16,3 cm. Não foi evidenciado efeito expressivo de suprimento de água no solo e balanço catiônico no solo sobre a altura de inserção de

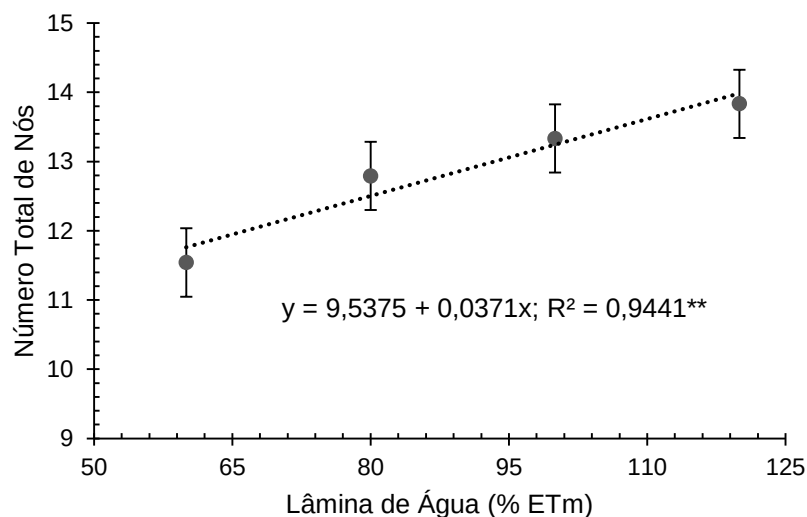
primeira vagem em plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO (Tabela 7). O valor médio desta variável-resposta foi de 8,9 cm, tendo sido condicionado pelas características genéticas do material em estudo. Entretanto, Gava *et al.* (2015) observaram efeito de suprimento hídrico do solo sobre altura de inserção de primeira vagem em plantas de soja semeadas em lisímetros de drenagem sob condição de casa de vegetação. A variável mencionada atingiu valor médio de 37,1 cm sob o tratamento DS4, ao passo que sob DS1 culminou em valor médio de 28,6 cm. Avaliando o impacto da irrigação plena e de diferentes regimes de déficit hídrico durante os estádios fenológicos da soja, Barbosa *et al.* (2020) encontraram diferenças significativas entre os tratamentos impostos sobre o desempenho fitotécnico da espécie. A altura de inserção de vagens sob irrigação plena foi superior em relação a quase todos os tratamentos com déficit hídrico, tendo apresentado variações entre 8,8 e 12,3 cm. Lange *et al.* (2021) identificaram efeito de seis relações Ca:Mg no solo, que variaram de 1:1 a 6:1, sobre altura de inserção de primeira vagem em plantas de soja. Os referidos autores observaram que as relações 1:1 e 2:1 foram aquelas que promoveram menores alturas de inserção de primeira vagem, tendo sido correspondentes a 4,8 cm sob relação Ca:Mg 1:1, e que a altura máxima de inserção equivalente a 7,4 cm se deu sob a relação Ca:Mg 6:1.

O número total de nós de plantas de soja do cultivar IAC Foscari-31 foi significativamente condicionado apenas pelos níveis de água no solo, ao passo que o número de nós viáveis foi influenciado somente pelo balanço catiônico no solo (Tabela 6). O aumento do número total de nós foi linear em função dos níveis de suprimento hídrico do solo (Figura 13), com valores absolutos oscilando entre 11,5 sob 60% da ETm e 13,8 sob 120% da ETm. O número de nós viáveis foi descrito por um modelo de regressão quadrático tomando como variável preditora a relação Ca:Mg no solo, com valores máximo e mínimo de 10,7 e 8,5 sob as proporções Ca:Mg 1:1 e 6:1, respectivamente (Figura 14).

Para as plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO, o número total de nós e de número de nós viáveis não foram afetados pelas relações Ca:Mg no solo (Tabela 7). Entretanto, os diferentes níveis de água no solo influenciaram consideravelmente o desempenho destas duas variáveis. As plantas apresentaram incremento linear no número total de nós e no número de nós viáveis sob os diferentes níveis de suprimento de água no solo adotados (Figura 15). Os valores máximos de número total de nós e de número de nós viáveis foram, respectivamente, de 16,3 e 15,6 sob 120% da ETm.

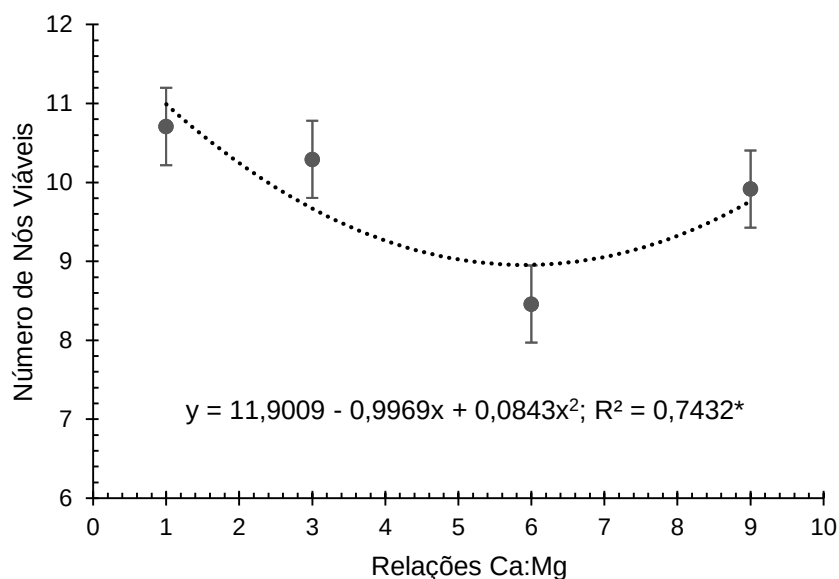
Com relação a seus valores mínimos, estes corresponderam a 12,5 e 11,5 sob 60% da ETm, respectivamente.

Figura 13 – Número total de nós de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de status de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 14 – Número de nós viáveis de plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.

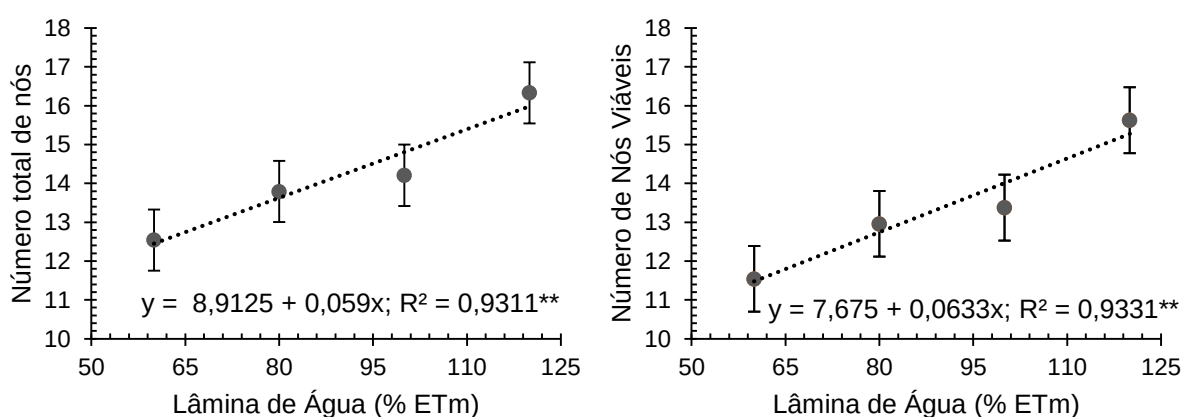


Fonte: O autor

Wijewardana *et al.* (2018), avaliando o desempenho fitotécnico dos cultivares de soja Asgrow AG5332 e P5333RY em vasos ao ar livre e transferidos para ambiente

controlado sob incidência de luz solar durante a floração, constataram que o número de nós das plantas de soja evidenciou resposta diferencial em função da lâmina de água de irrigação aplicada no solo. Os níveis de irrigação impostos neste estudo foram correspondentes a 100, 80, 60, 40 e 20% da ET_m registrada em escala diária. O estresse hídrico nos estádios fenológicos iniciais compromete a produtividade das culturas por meio da redução do número de nós (Brevedan; Egli, 2003). O número de nós é uma variável que caracteriza a fase vegetativa na cultura da soja, definida como o período entre a emergência e a emissão do último nó (Setiyono *et al.*, 2007). Entretanto, Wijewardana *et al.* (2018) relataram que geralmente os nós de cultivares de soja de crescimento indeterminado continuam a se diferenciar mesmo após o início da floração, aumentando o seu número.

Figura 15 – Número total de nós e número de nós viáveis de plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função de suprimento de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

5.1.4 Número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG)

O NVP total e viáveis de soja do cultivar IAC Foscari-31 não foi condicionado pelo status de água no solo, porém foi governado pelo balanço catiônico no solo (Tabela 8). Houve ainda interação entre níveis de água no solo e as relações Ca:Mg no solo para NVP total e viáveis. A Figura 16 descreve o comportamento de NVP total e viáveis para cada balanço catiônico no solo dentro de diferentes níveis de água no solo. Um comportamento quadrático foi descrito sob a relação Ca:Mg 3:1 para NVP total e viáveis em decorrência de suprimento hídrico do solo, com valores máximos e

mínimos correspondentes a 27,8 e 24,7 obtidos sob 100% da ETm e 17,8 e 16,3 sob 60% da ETm, respectivamente. Entretanto, nenhum significado agrônômico prático poderá ser evidenciado pela proposição de modelos de regressão de terceiro grau sob as proporções Ca:Mg 6:1, conforme ilustra a Figura 16.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para número de vagens por planta (NVP) total e viáveis, número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de plantas do cultivar de soja IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		NVP		NGV
		Totais	Viáveis	
Água (W)	3	29,6302 ^{ns}	29,4358 ^{ns}	0,1718*
Ca:Mg (R)	3	89,1441**	81,6719**	0,2088*
W x R	9	59,6950**	52,0747**	0,1637**
C.V. (%)		18,45	19,15	10,24
Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		NGP	MGP	MMG
Água (W)	3	295,9913 ^{ns}	8,9103*	976,0000 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	668,7691**	19,2862**	1324,0000 ^{ns}
W x R	9	309,1673*	5,9643*	510,0000 ^{ns}
C.V. (%)		24,04	22,14	14,28

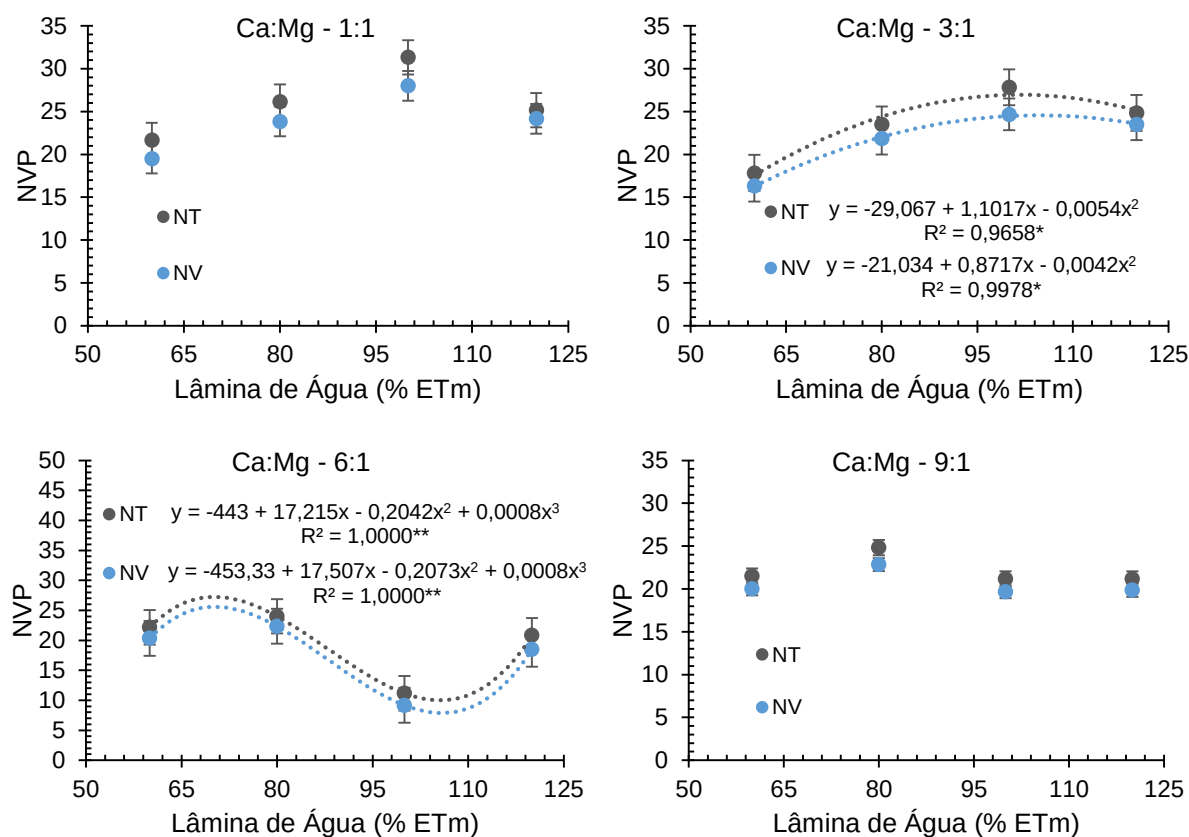
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 16 – Número de vagens por planta total e viáveis de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de suprimento de água no solo para cada relação Ca:Mg no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. NT: Número de vagens total. NV: Número de vagens viáveis. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

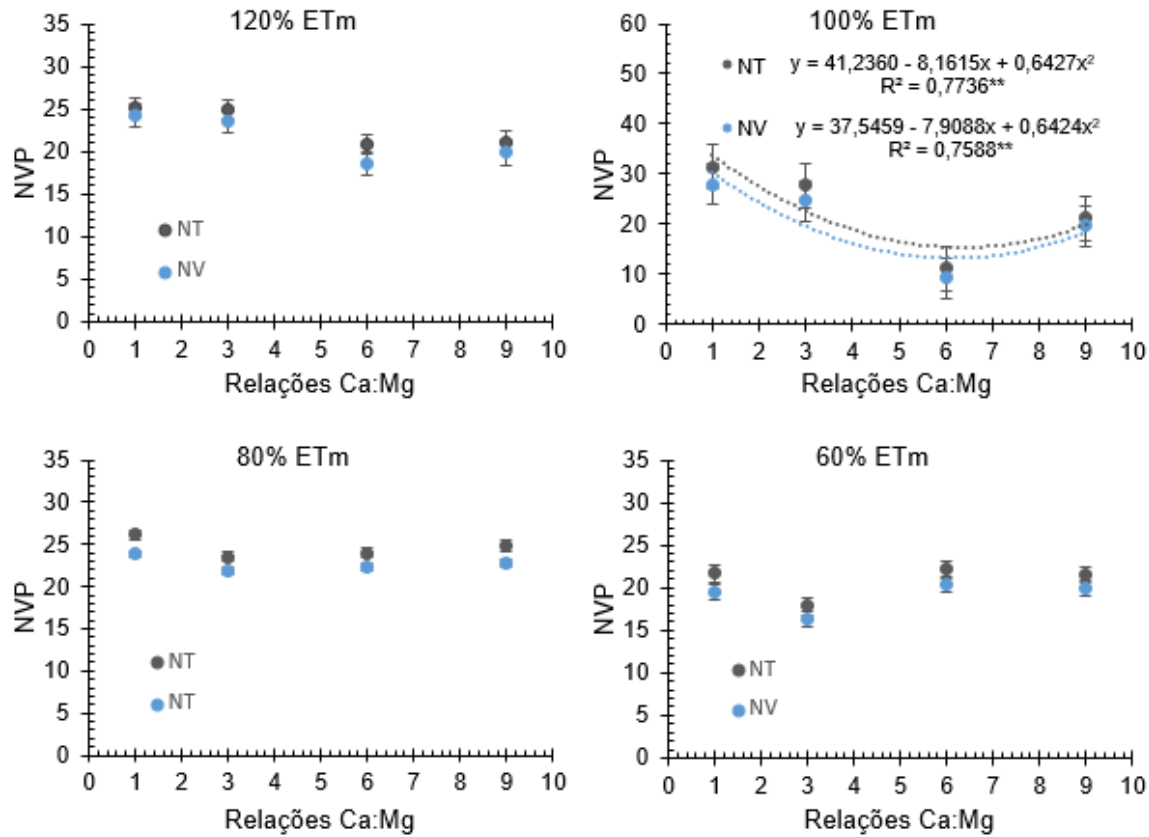


Fonte: O autor

Com relação ao fator suprimento de água no solo, apenas o nível 100% da ETm apresentou efeito significativo sobre NVP total e viáveis em função das proporções de Ca:Mg. Sob suprimento adequado de água no solo dado pela imposição do tratamento 100% da ETm, o NVP total e viáveis foi expresso por um modelo de regressão quadrático em função da relação Ca:Mg no solo, com valores máximos respectivamente de 31,3 e 28,0 sob balanço de cátions 1:1, e mínimos de 11,2 e 9,2 sob balanço de cátions 6:1 (Figura 17).

Para o cultivar BMX Zeus IPRO, o NVP total e viáveis de plantas de soja não foi significativamente afetado pela relação Ca:Mg no solo (Tabela 9). Sob o efeito do suprimento de água no solo, as plantas demonstraram incremento linear destas variáveis-resposta, conforme ilustra a Figura 18. Os maiores valores de NVP total e viáveis foram de 28,1 e 26,6 sob 120% da ETm, respectivamente, ao passo que os menores valores de NVP total e viáveis foram de 20,3 e 18,9 sob 60% da ETm, respectivamente.

Figura 17 – Número de vagens por planta total e viáveis de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de suprimento de água no solo em ambiente protegido sob as condições climáticas locais. NT: Número de vagens total. NV: Número de vagens viáveis. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Tabela 9 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste F para número de vagens por planta (NVP) total e viáveis, número de grãos por vagem (NGV), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de plantas do cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		NVP		NGV
		Totais	Viáveis	
Água (W)	3	156,3400**	152,3667**	0,0387 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	4,9367 ^{ns}	3,4500 ^{ns}	0,0128 ^{ns}
W x R	9	11,7600 ^{ns}	7,7611 ^{ns}	0,0793*
C.V. (%)		13,42	15,06	7,67
Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		NGP	MGP	MMG
Água (W)	3	653,0667**	34,9797**	117,1000 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	34,6000 ^{ns}	1,2793 ^{ns}	266,6667 ^{ns}
W x R	9	39,0000 ^{ns}	0,8984 ^{ns}	268,6778 ^{ns}
C.V. (%)		13,85	15,44	5,86

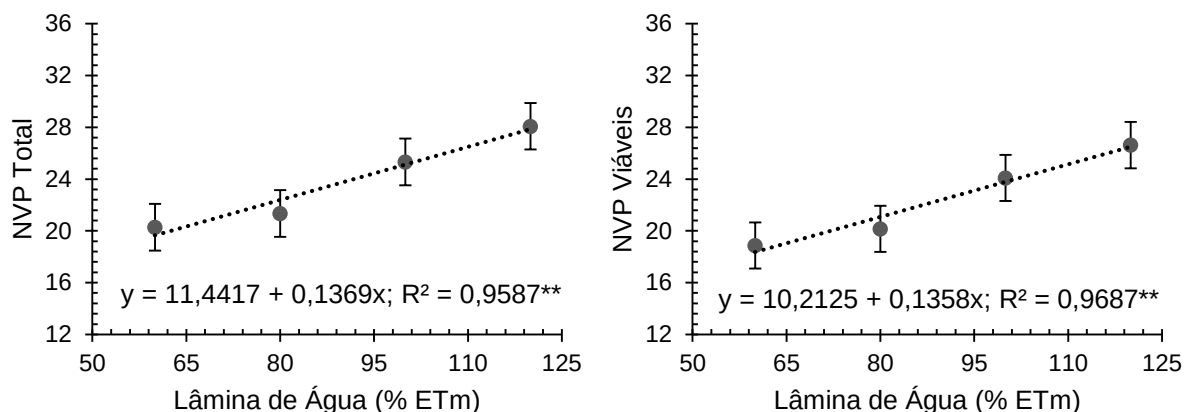
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 18 – Número de vagens por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Em um estudo conduzido sob condições de ambiente protegido com a cultura da soja, Fioreze *et al.* (2011) avaliaram o efeito de suprimento de água no solo sobre a resposta biológica de três genótipos distintos da referida espécie (CD 201, CD 202 e CD 217). Dois tratamentos de água foram impostos neste estudo: a) lâmina ideal de água aplicada ao longo de toda estação de crescimento da cultura; b) lâmina adotada sob supressão das regas desde o estágio fenológico R1 até o momento em que o solo atingia umidade gravimétrica equivalente a $15,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. O tratamento relativo à deficiência hídrica nas plantas causou diminuição no NVP total e viáveis do genótipo CD 217, bem como reduziu o NVP total do genótipo CD 201. Este estudo evidencia que além do efeito isolado de status de água no solo sobre o desempenho fitotécnico da soja, nota-se também o efeito de genótipos sobre a expressão dos componentes de rendimento da cultura, aspecto que corrobora a proposição de dois genótipos distintos como alvo de investigação em nosso trabalho de tese.

Para a cultura da soja semeada em lisímetros no interior de casa de vegetação, Gava *et al.* (2015) verificaram que o status de água no solo afetou significativamente o NVP. O NVP sob a influência de déficit hídrico durante todo ciclo de desenvolvimento da cultura foi afetado negativamente com valor médio de 22,7. Entretanto, os maiores valores para a referida variável-resposta foram de 30,8; 30,7 e 30,6 sob a ação dos tratamentos ES1, ES2 e ES4, respectivamente.

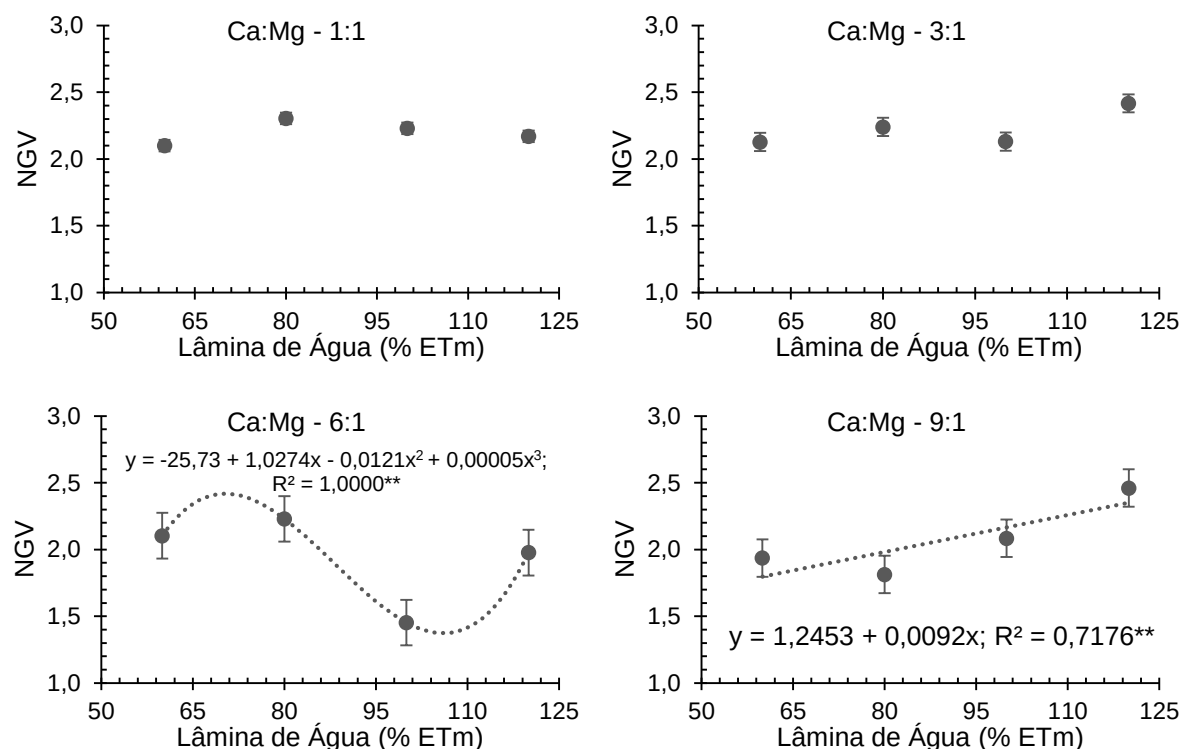
Wijewardana *et al.* (2018) constataram em dois cultivares de soja diferença significativa do NVP sob o efeito de cinco níveis de água no solo. A redução da variável-resposta submetida ao nível mais severo de estresse hídrico em comparação a condição ideal de suprimento de água no solo foi de 45,5 e 47,1% para Asgrow

AG5332 e P5333RY, respectivamente. Segundo os referidos autores, a disponibilidade hídrica no solo exerce efeito sobre o crescimento de ramos, haja visto que suprimento adequado de água no solo promove maior desenvolvimento de ramos, condicionando, assim, maior rendimento de vagens. Episódios de déficit hídrico durante as fases de floração e enchimento dos grãos provocam fechamento de estômatos e enrolamento de folhas, aumentando desta forma a queda prematura de flores e, conseqüentemente, o abortamento de vagens (Farias; Neumaier; Nepomuceno, 2009). De acordo com Desclaux e Roumet (1996), o NVP é afetado negativamente por déficit hídrico nos estádios R3-R5.

O NGV do cultivar IAC Foscarin-31 foi afetado significativamente pelos fatores suprimento hídrico do solo e balanço catiônico no solo (Tabela 8). A variável NGV também apresentou efeito de interação entre suprimento de água no solo e proporção Ca:Mg no solo. A resposta de NGV sob diferentes níveis de água no solo foi descrita por um modelo linear para a proporção Ca:Mg 9:1. Sob relações Ca:Mg 1:1 e 3:1, os valores de NGV não diferiram estatisticamente entre si (Figura 19). Entretanto, nenhum significado agrônômico prático foi identificado pela proposição de modelos de regressão sob a influência da relação 6:1. Os valores de NGV variaram de 2,3 sob 80% da ETm a 2,1 sob 60% da ETm para a relação Ca:Mg 1:1, de 2,4 sob 120% da ETm a 2,1 sob 60% da ETm para a relação Ca:Mg 3:1, e de 2,5 sob 120% da ETm a 1,8 sob 80% da ETm para a relação Ca:Mg 9:1 (Figura 19).

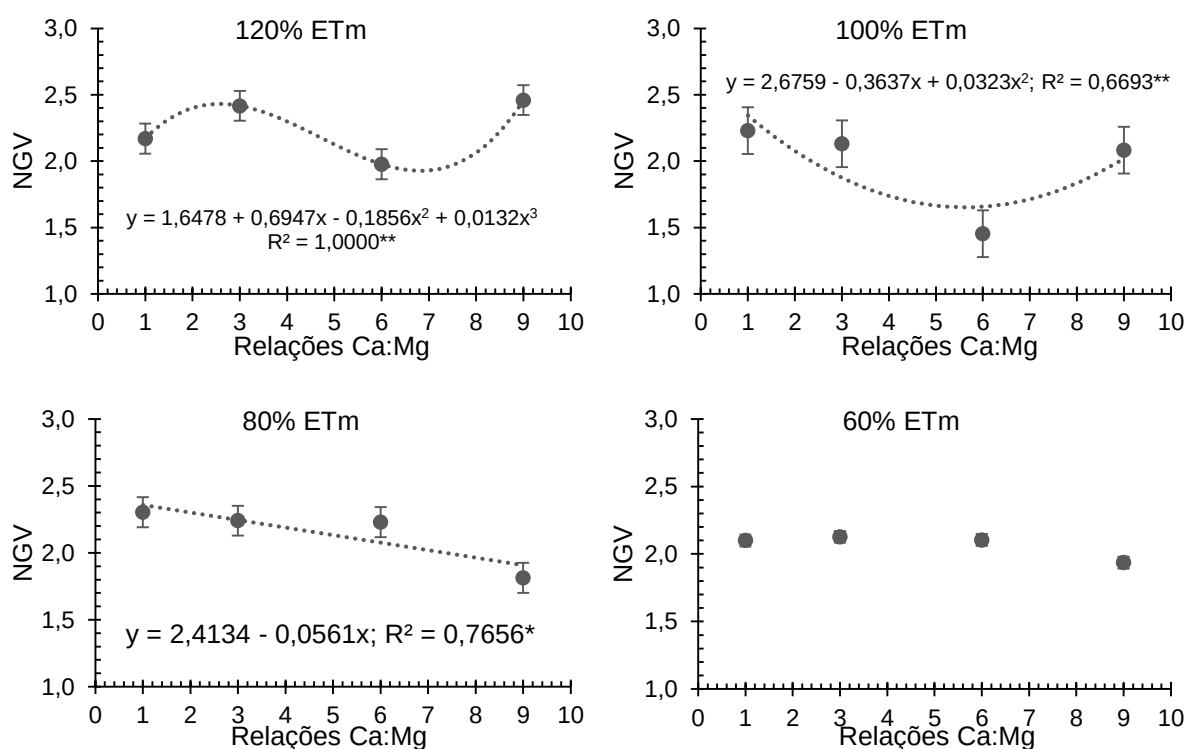
O suprimento de água no solo pertinente aos níveis 120%, 100% e 80% da ETm afetou significativamente o desempenho de NGV para as diferentes relações Ca:Mg no solo (Figura 20). O NGV sob balanços catiônicos do solo foi descrito por um modelo de regressão de terceiro grau sob nível de umidade do solo correspondente a 120% da ETm, com valores máximo e mínimo de 2,5 e 2,0 para as relações Ca:Mg 9:1 e 6:1, respectivamente. Sob status de água no solo de 100% da ETm, a proporção Ca:Mg resultou em um comportamento quadrático em função das proporções Ca:Mg, com valores máximo e mínimo de 2,2 e 1,5 para as relações Ca:Mg 1:1 e 6:1, respectivamente. Para o suprimento hídrico no solo de 80% da ETm, o NGV foi descrito por um modelo linear em função do balanço catiônico, com valores máximo e mínimo de 2,3 e 1,8 sob as relações Ca:Mg 1:1 e 9:1, respectivamente.

Figura 19 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 20 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

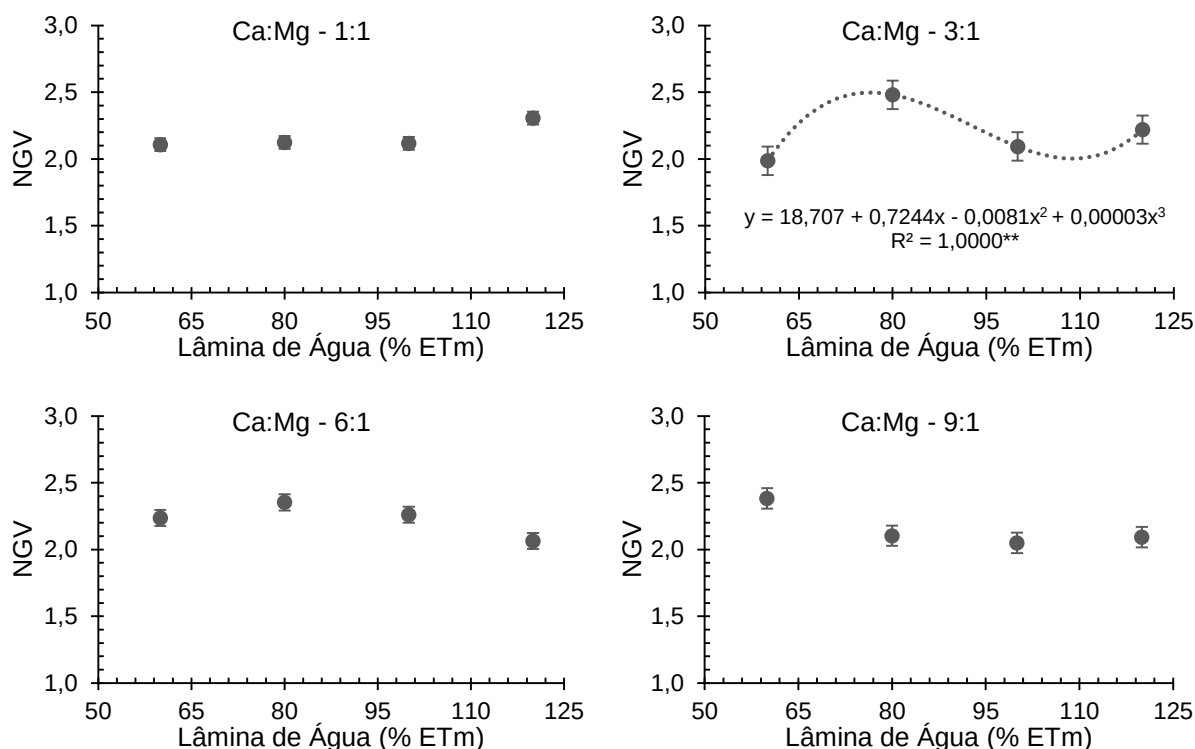


Fonte: O autor

O NGV de soja do cultivar BMX Zeus IPRO não foi afetado significativamente pelo nível de água e, nem tampouco, pela relação Ca:Mg no solo. Porém, um efeito significativo da interação entre suprimento de água no solo e balanço de cátions foi observado para essa variável (Tabela 9). O NGV de soja do cultivar BMX Zeus IPRO para a relação Ca:Mg 3:1 descreveu um modelo cúbico em função da disponibilidade hídrica do solo (Figura 21). Para cada relação Ca:Mg, os valores máximos e mínimos foram os seguintes, respectivamente: a) relação 1:1 – 2,3 sob 120% da ETm e 2,1 sob 60% da ETm; b) relação 3:1 – 2,5 sob 80% da ETm e 2,0 sob 60% da ETm; c) relação 6:1 – 2,4 sob 80% da ETm e 2,1 sob 120% da ETm; d) relação 9:1 – 2,4 sob 60% da ETm e 2,1 sob 100% da ETm (Figura 21). Desclaux, Huynh e Roumet (2000), estudando o efeito de status de água no solo em cultivares de soja com hábitos de crescimento determinado e indeterminado sob dois níveis de água (30 e 50% da capacidade de água disponível no solo) nos componentes de rendimento da espécie, constataram que a deficiência hídrica durante o subperíodo de desenvolvimento vegetativo diminuiu a altura das plantas bem como o número de vagens por unidade de matéria seca, comprometendo, assim, a elongação das vagens. Para os referidos autores, a deficiência hídrica no início do subperíodo de enchimento de grãos reduziu o número de sementes por vagem, ao passo que o stress hídrico no final deste subperíodo promoveu decréscimo no peso de sementes de soja.

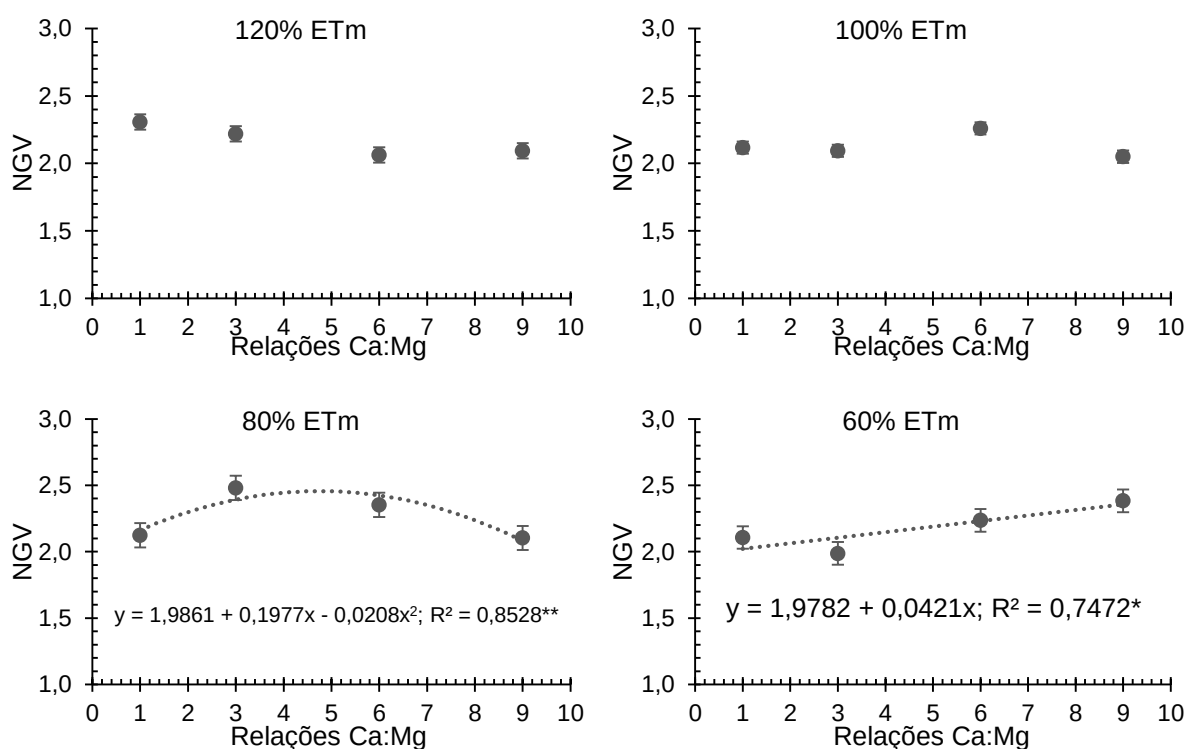
Sob os níveis de suprimento de água no solo de 120% e 100% da ETm, o NGV não foi afetado significativamente sob a influência de diferentes relações Ca:Mg no solo (Figura 22). Sob o tratamento 80% da ETm, NGV foi explicado por um modelo de regressão quadrático em função das relações Ca:Mg, com valor máximo de 2,5 para a proporção Ca:Mg 3:1 e com valor mínimo 2,1 para a proporção Ca:Mg 9:1. O NGV sob a influência do tratamento 60% da ETm sofreu incremento linear crescente em função do balanço de cátions, com valores máximo e mínimo equivalente a 2,0 e 2,4 sob as relações Ca:Mg 3:1 e 9:1, respectivamente.

Figura 21 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo para relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

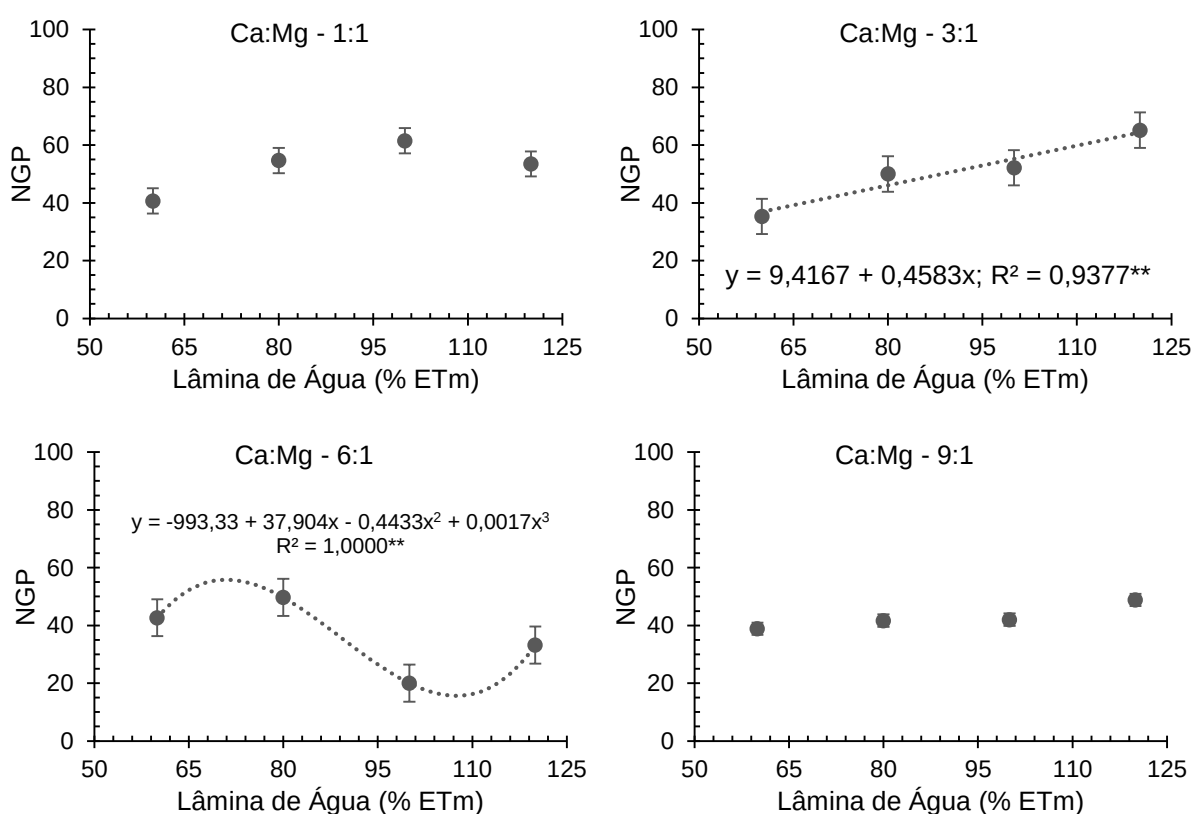
Figura 22 – Número de grãos por vagem de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

O NGP de soja do cultivar IAC Foscarin-31 foi afetado significativamente pelos níveis dos fatores estudados (Tabela 8). Essa variável-resposta também apresentou efeito de interação entre status de água no solo e balanço catiônico no solo. O NGP para a relação 3:1 apresentou resposta linear mediante incremento do suprimento de água no solo com valores variando de 35,3 sob 60% da ETm a 65,2 sob 120% da ETm (Figura 23). Nenhum significado agrônômico prático foi descrito pela proposição de modelos de regressão sob balanço Ca:Mg 6:1. Para as proporções Ca:Mg de 1:1 e 9:1, o NGP não foi afetado em função do status de água no solo. Para a relação 1:1, o NGP variou de 40,7 sob 60% da ETm a 61,5 sob 100% da ETm. Para o balanço catiônico 9:1, a amplitude de variação de NGP foi de 48,8 sob 120% da ETm a 38,8 sob 60% da ETm.

Figura 23 – Número de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

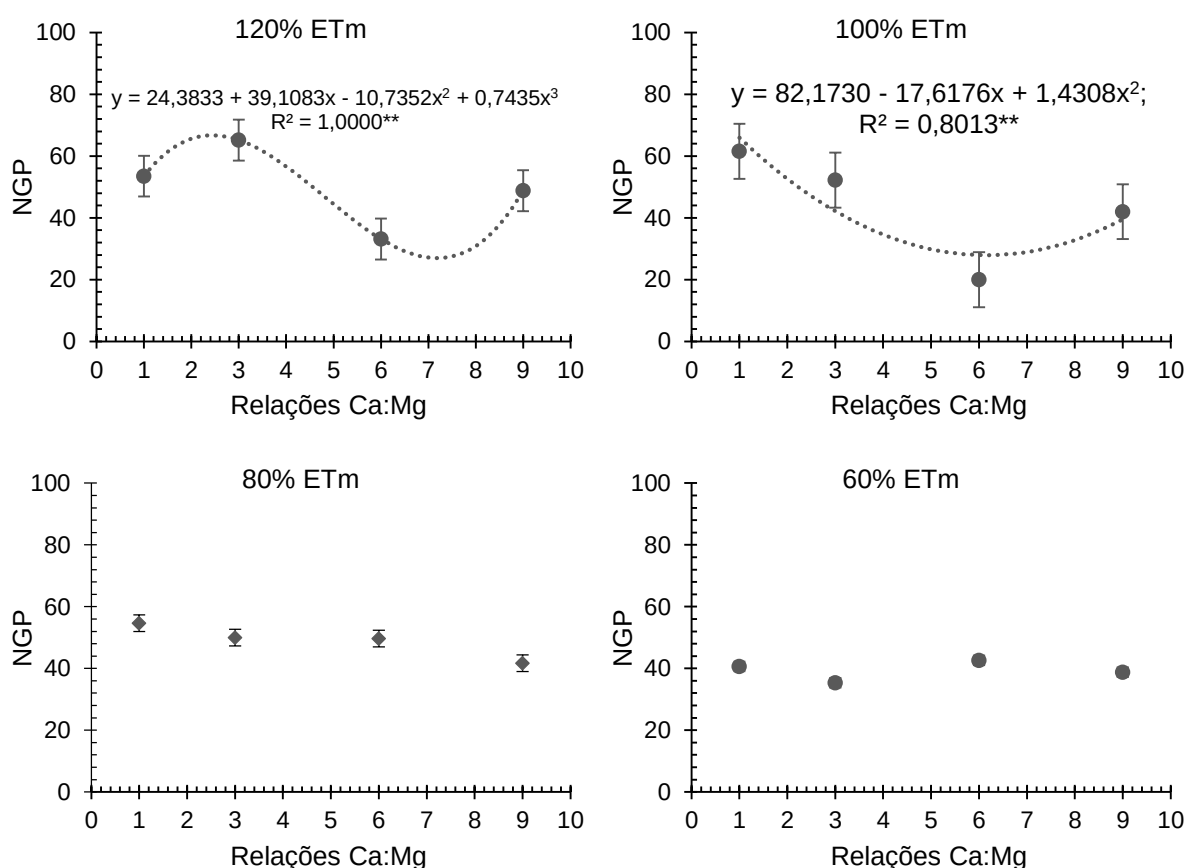


Fonte: O autor

Considerando níveis de água no solo correspondentes a 120% e 100% da ETm, o NGP diferiu estatisticamente em função do balanço catiônico no solo (Figura 24). Sob a influência do tratamento 120% da ETm, o NGP foi descrito por um modelo de

regressão de terceiro grau em função do balanço catiônico no solo, com valor máximo de 65,2 para a relação Ca:Mg 3:1 e valor mínimo de 33,2 para a relação Ca:Mg 6:1. Para plantas de soja submetidas ao tratamento 100% da ET_m, o NGP foi expresso por um modelo de regressão quadrático em função das proporções Ca:Mg no solo, com valores máximo e mínimo de 61,5 e 20,0 para balanço de cátions de 1:1 e 6:1, respectivamente.

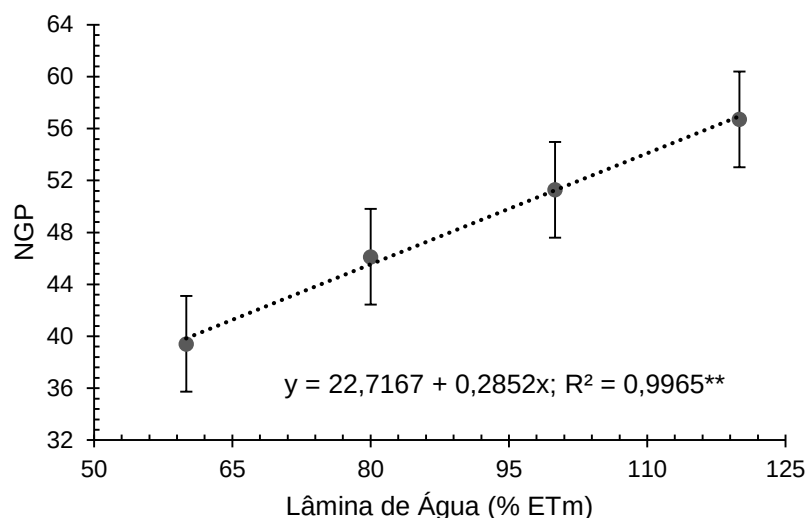
Figura 24 – Número de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscari-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Da mesma forma do que foi observado nas variáveis referente ao NVP, o NGP das plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO não apresentou influência das relações Ca:Mg (Tabela 9) e apresentou aumento linear em função do nível de água no solo (Figura 25). Os valores máximos e mínimos de NGP foram de 56,7 e 39,4 para 120% e 60% da ET_m, respectivamente.

Figura 25 – Número de grãos por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



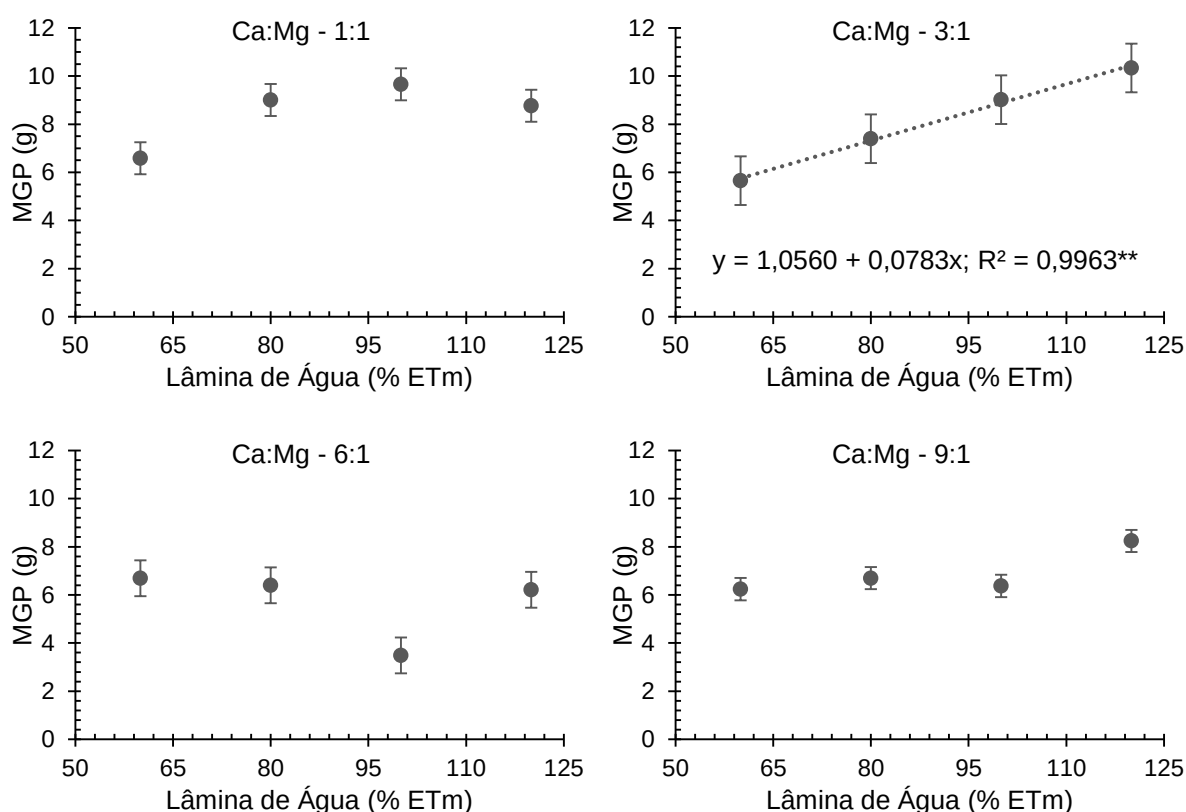
Fonte: O autor

Dos três genótipos soja avaliados por Fioreze *et al.* (2011) em ambiente protegido sob condições de irrigação plena e déficit hídrico, apenas o NGP do genótipo CD 217 apresentou efeito significativo quanto ao conteúdo de água no solo. O NGP oscilou de 120 a 76 em situação de suprimento adequado de água no solo e condição de estresse hídrico, respectivamente. Gava *et al.* (2015) detectaram efeito de suprimento hídrico do solo sobre o NGP de soja cultivada em ambiente protegido, haja visto que os tratamentos DCT (déficit hídrico durante todo ciclo) e DS3 (déficit hídrico durante a fase de enchimento de grãos) afetaram negativamente a expressão da variável-resposta em estudo. Uma redução quadrática de 44 e 46% em NGP foi observada por Wijewardana *et al.* (2018) nos cultivares de soja Asgrow AG5332 e P5333RY, respectivamente, sob níveis de água no solo variando de 100% a 20% da evapotranspiração diária. O stress hídrico durante a fase de enchimento de grãos acarreta em maior redução do NGP devido ao encurtamento do subperíodo de enchimento de grãos (Board 1987; Brevedan; Egli, 2003). Wijewardana *et al.* (2018) afirmam que a redução do NGP está relacionada ao menor NVP sob condições de estresse hídrico. Em um experimento conduzido em ambiente protegido, Dornbos, Mullen e Shibles (1989) concluíram que a redução da produtividade das culturas está mais relacionada com a diminuição do número de grãos por planta do que com o tamanho de grãos. Lange *et al.* (2021) não observaram efeito das seis relações Ca:Mg

no solo compreendidas entre 1:1 a 6:1 sobre NGP de espécies cultivadas sob condições de ambiente protegido.

A MGP de soja do cultivar IAC Foscarin-31 foi influenciada consideravelmente por status de água no solo e balanço catiônico no solo (Tabela 8). Também houve interação entre os fatores água e relação Ca:Mg no solo (Tabela 8). Os valores de MGP para a relação Ca:Mg 3:1 apresentaram um aumento linear em função do incremento da umidade do solo. Sob as relações Ca:Mg 1:1, 6:1 e 9:1, MGP não foi afetada por suprimento de água no solo (Figura 26).

Figura 26 – Massa de grãos por planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

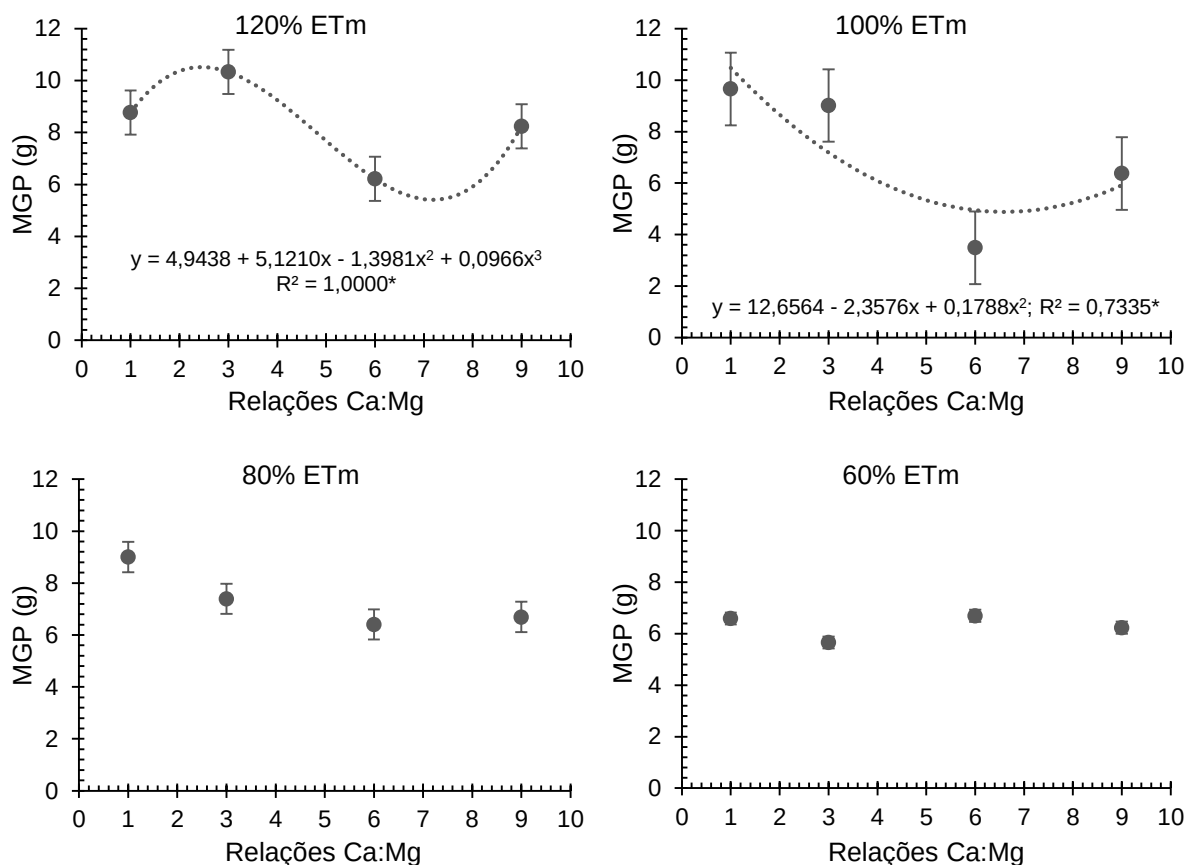


Fonte: O autor

Constatou-se que a MGP foi afetada pela imposição de diferentes relações Ca:Mg no solo sob os tratamentos 120% e 100% da ETm (Figura 27). No nível de suprimento hídrico de 120% da ETm, a MGP foi descrita por um modelo de regressão de terceiro grau em função do balanço catiônico, com valor máximo de 10,3 g para a relação Ca:Mg 3:1 e valor mínimo de 6,2 para a relação Ca:Mg 6:1. Sob status de água no solo de 100% da ETm, a MGP apresentou um comportamento quadrático em

função do balanço de cátions, com valores máximo e mínimo de 9,7 g e 3,5 g, sob balanço de cátions de 1:1 e 6:1, respectivamente.

Figura 27 – Massa de grãos planta de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



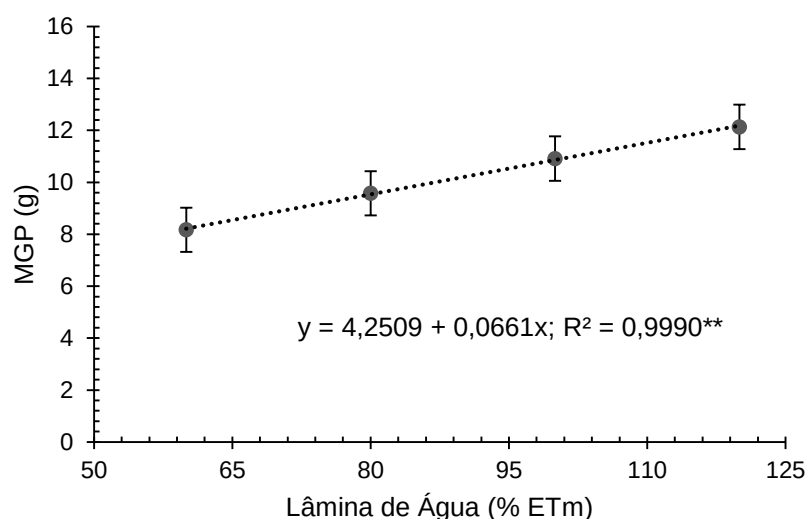
Fonte: O autor

A MGP de soja do cultivar BMX Zeus IPRO não foi influenciada pelo balanço catiônico (Tabela 9), porém essa variável apresentou incremento linear de acordo com o crescente suprimento hídrico do solo (Figura 28). Efeito de interação entre suprimento de água e relação Ca:Mg no solo não foi detectado no cultivar BMX Zeus IPRO sobre a MGP de soja. Os valores máximo e mínimo de MGP foram de 12,1 g e 8,2 g para 120% e 60% da ETm, respectivamente.

Por ocasião da avaliação de dois cultivares de soja submetidos a situações de plena irrigação e déficit hídrico, Fioreze *et al.* (2011) verificaram que a MGP dos cultivares CD 201 e CD 217 foram influenciadas pelas condições hídricas do solo. A MGP dos cultivares CD 201 e CD 217 correspondeu a 24,9 e 17,9 g, bem como a 26,9 e 14,1 g, sob condições de suprimento hídrico adequado e inadequado, respectivamente.

Wijewardana *et al.* (2018) observaram uma redução de 50 e 64% na MGP entre plantas submetidas a aplicação da lâmina ideal de água e déficit hídrico severo para os cultivares Asgrow AG5332 e P5333RY, respectivamente. Gava *et al.* (2015) observaram que a produtividade das plantas de soja sob a imposição dos tratamentos DCT e DS3 foi comprometida substancialmente pelo status de água no solo. As produtividades da soja sob a influência dos tratamentos DCT e DS3 foram de 1715,3 e 1728,4 kg ha⁻¹, respectivamente. A produtividade máxima foi de 2991,6 kg ha⁻¹, tendo sido alcançada sob o tratamento ES1. Esses limiares de rendimento biológico da cultura demonstraram que déficit hídrico imposto somente na fase de enchimento de grãos proporcionou desempenho fitotécnico similar àquele observado em campos de produção de soja submetidos a deficiência hídrica durante todo ciclo de desenvolvimento das plantas.

Figura 28 – Massa de grãos por planta de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Lange *et al.* (2021) constataram que as relações 1:1, 2:1 e 5:1 resultaram em maiores valores de MGP de soja. A MGP oscilou de 8,29 para a relação 4:1 a 9,57 para a relação 2:1. Holzschuh (2007) não detectou diferença significativa no rendimento de grãos de soja cultivada a campo em decorrência de diferentes relações Ca:Mg no solo para as diferentes proporções de calcários calcíticos e dolomíticos com a calagem superficial ou incorporada. As proporções de calcário aplicadas no solo consideraram

as seguintes combinações: 100% calcítico; 75% calcítico e 25% dolomítico; 50% calcítico e 50% dolomítico; 25% calcítico e 75% dolomítico; e 100% dolomítico.

De maneira similar, Chaganti *et al.* (2021) não constataram efeito significativo na produtividade de soja cultivada nas localidades Hirzel e West Badger, Ohio, EUA, em função de diferentes relações Ca:Mg no solo obtidas mediante aplicações de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e sulfato de magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) no período compreendido entre 2015 a 2020. Por ocasião da condução desse experimento de campo foram adotados três tratamentos: a) aplicação de gesso para obtenção de maiores relações Ca:Mg no solo, b) aplicação de sulfato de magnésio para obtenção de menores relações Ca:Mg e c) controle – sem aplicação de produtos químicos no solo.

Num experimento em casa de vegetação, E. L. Oliveira e Parra (2003) avaliaram a resposta fitotécnica do feijoeiro sob a influência das seguintes relações molares entre Ca e Mg no solo: 0,5; 1; 2; 4; 6 e 8. Para os referidos autores, essas diferentes relações molares não comprometeram o rendimento de grãos.

Não houve diferença significativa para a MMG quanto ao nível de água no solo e às relações Ca:Mg para os cultivares IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO (Tabelas 8 e 9). Os valores médios de MMG foram de 157,9 g e 208,7 g para IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO, respectivamente. Esses resultados podem ser explicados pelas características genotípicas dos materiais estudados. Entretanto, Wijewardana *et al.* (2018) encontraram diferenças significativas na massa de cem grãos de soja sob a utilização de cinco tratamentos de água no solo, variando desde condições ideais de água no solo (100% da ETm) ao déficit hídrico mais severo (20% da ETm). Gava *et al.* (2015) identificaram efeito de status de água no solo sobre a massa de cem grãos. Os tratamentos com déficit hídrico durante todo ciclo de desenvolvimento da soja e déficit hídrico no subperíodo de enchimento de grãos diminuíram significativamente a massa de cem grãos, com limiares mais baixos em comparação aos demais tratamentos de água considerados pelos autores supracitados. Lange *et al.* (2021) verificaram impacto de diferentes relações Ca:Mg no solo (1:1 a 6:1) sobre a MMG de soja cultivada em ambiente protegido sob as condições edafo-climáticas de Sinop, MT. Os referidos autores observaram que a MMG sob relação Ca:Mg 2:1 do solo correspondente a 85,9 g foi a mais elevada em comparação a MMG para as relações Ca:Mg do solo 1:1 e 4:1 correspondentes a 77,7 e 76,7 g, respectivamente.

Em geral, a produtividade é o resultado da taxa e duração do período efetivo de enchimento de grãos (Wijewardana *et al.*, 2018). Assim, plantas submetidas à

deficiência hídrica durante essa fase fenológica apresentam redução de tamanho e de massa de grãos (Salinas *et al.*, 1997). Segundo Anjum *et al.* (2011), a redução do enchimento de grãos é devida à diminuição do particionamento de assimilados e limitação das atividades de enzimas responsáveis pela síntese de sacarose e amido. De acordo com Salinas *et al.* (1997), a diminuição do tamanho e da massa de grãos é resultado da redução do suprimento de fotoassimilados pela planta e/ou inibição do metabolismo do grão. Wijewardana *et al.* (2018) afirmam que o déficit hídrico proporciona grãos menores e murchos, evidenciando que seu período de enchimento é mais importante do que a taxa de crescimento sobre a menor massa média de grãos.

A produtividade de grãos é uma consequência da expressão e associação de diversos componentes do crescimento das plantas (Anjum *et al.*, 2011). O NVP, o NGV e a MGP são considerados componentes de rendimento de maior importância na expressão do potencial produtivo da cultura da soja (Wijewardana *et al.*, 2018). O déficit hídrico proporciona redução severa nas características concernentes ao rendimento das espécies cultivadas, provavelmente por afetar as propriedades das trocas gasosas das folhas, limitando o crescimento dos tecidos, carregamento do floema, translocação de assimilados e particionamento da matéria seca (Farooq *et al.*, 2009).

Efeito significativo para as variáveis NVP, NGP e MGP quanto ao balanço catiônico foi identificado para o cultivar IAC Foscarin-31 sob maiores níveis de suprimento hídrico. Esse resultado está relacionado com as características do cultivar e do status de água no solo, considerando que absorção de Ca e Mg pelas raízes ocorre por fluxo de massa. O menor rendimento de grãos obtido pelo cultivar IAC Foscarin-31 sob maiores relações Ca:Mg no solo pode ser atribuído a maiores teores de Ca na solução do solo, culminando em menor absorção de K e Mg.

O cultivar IAC Foscarin-31 não expressou a sua potencialidade produtiva em ambiente protegido exposto às condições meteorológicas vigentes no município de Ponta Grossa, PR, devido ao acamamento e estiolamento das plantas. O cultivo do genótipo supracitado é recomendado para as localidades de Goiás e Norte do Estado de São Paulo, não tendo sido reportadas na literatura informações relativas a seu desempenho sob cultivo protegido em outras localidades brasileiras. Esta resposta biológica indesejável que restringiu o crescimento e o desenvolvimento deste genótipo impossibilitou a avaliação do efeito de possíveis impactos do status de água e do balanço catiônico no solo sobre o rendimento biológico desse material genético em nosso estudo.

A resposta similar encontrada entre as distintas relações Ca:Mg no solo para o cultivar BMX Zeus IPRO evidencia que qualquer uma das relações de cátions foi eficiente para promover suprimento de Ca e Mg para as plantas deste genótipo de soja. A disponibilidade e o suprimento de Ca e Mg para o referido cultivar não foi impactada pelo gradiente de relações Ca:Mg criado no solo após a aplicação de CaCO_3 e MgCO_3 e o período de incubação que antecedeu a semeadura. Esse resultado demonstrou para o cultivar BMX Zeus IPRO que o fator balanço catiônico não influenciou negativamente os parâmetros biométricos e os componentes de rendimento da espécie em estudo.

5.1.5 Atributos químicos do solo

Os teores de Ca trocável no solo após o cultivo da soja não foram afetados pelo status de água no solo. Entretanto, essa variável-resposta foi significativamente condicionada pelo balanço de cátions, tanto para o cultivar IAC Foscarin-31 como para o cultivar BMX Zeus IPRO (Tabelas 10 e 11). Um incremento linear de Ca trocável no solo foi observado em função do aumento da relação Ca:Mg no solo após o cultivo do genótipo IAC Foscarin-31, com valores oscilando entre 4,32 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob a proporção Ca:Mg 1:1 e 5,24 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob a proporção Ca:Mg 9:1 (Figura 29). Da mesma forma, após o cultivo do genótipo BMX Zeus IPRO, os teores de Ca trocável foram descritos por um modelo de regressão linear, com valores máximo e mínimo de 5,17 e 4,53 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob as proporções Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente (Figura 30). Esse resultado está relacionado ao incremento do Ca obtido em função do aumento de CaCO_3 e da redução de MgCO_3 aplicados no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

Tabela 10 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para teores de Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Ca trocável	Mg trocável	K trocável
Água (W)	3	0,5511 ^{ns}	0,0144 ^{ns}	0,1178**
Ca:Mg (R)	3	1,9875**	1,6068**	0,0007 ^{ns}
W x R	9	0,2957 ^{ns}	0,0391 ^{ns}	0,0022 ^{ns}
C.V. (%)		9,01	29,17	12,85

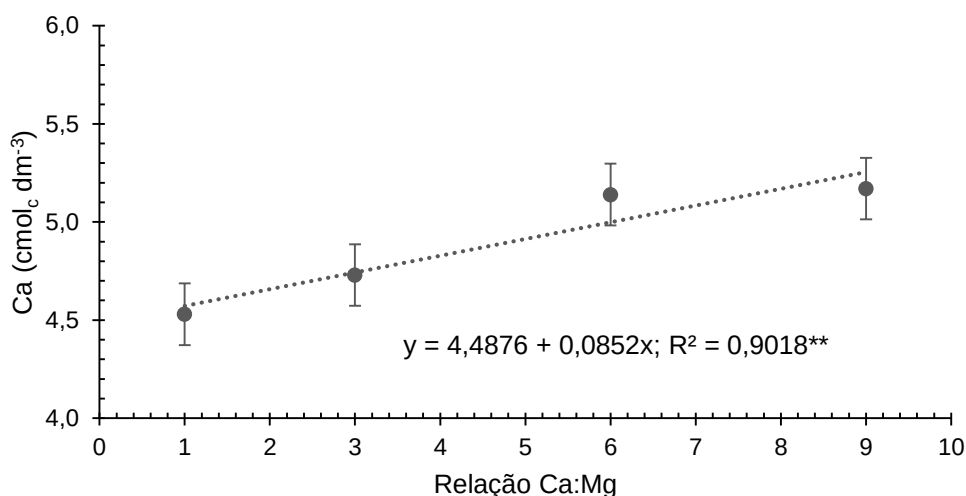
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 29 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com a finalidade de avaliar o efeito do balanço catiônico no solo sobre o desempenho fitotécnico do feijoeiro em ambiente protegido, Luciano Junior (2018) conduziu um experimento em ambiente protegido em Latossolo Bruno Distroférico típico e Latossolo Bruno Aluminoférico típico. As relações Ca:Mg do solo utilizadas foram de 0,5:1; 1:1; 2:1; 4:1 e 8:1. Os teores médios de Ca trocável dos dois solos aumentaram linearmente de 7,7 para 10,8 cmol_c dm⁻³ sob as proporções de Ca:Mg 0,5:1 e 8:1, respectivamente. Guimarães Júnior *et al.* (2013), avaliando o efeito das relações Ca:Mg 1:1, 2:1, 4:1, 6:1 e 8:1 sobre a concentração de Ca no solo em três espécies forrageiras, verificaram uma maior concentração do nutriente no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

Tabela 11 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para dos teores Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Ca trocável	Mg trocável	K trocável
Água (W)	3	0,1771 ^{ns}	0,0050 ^{ns}	0,1094 ^{**}
Ca:Mg (R)	3	1,1888 ^{**}	1,8594 ^{**}	0,0015 ^{ns}
W x R	9	0,1452 ^{ns}	0,0283 ^{ns}	0,0019 ^{ns}
C.V. (%)		8,60	28,94	14,73

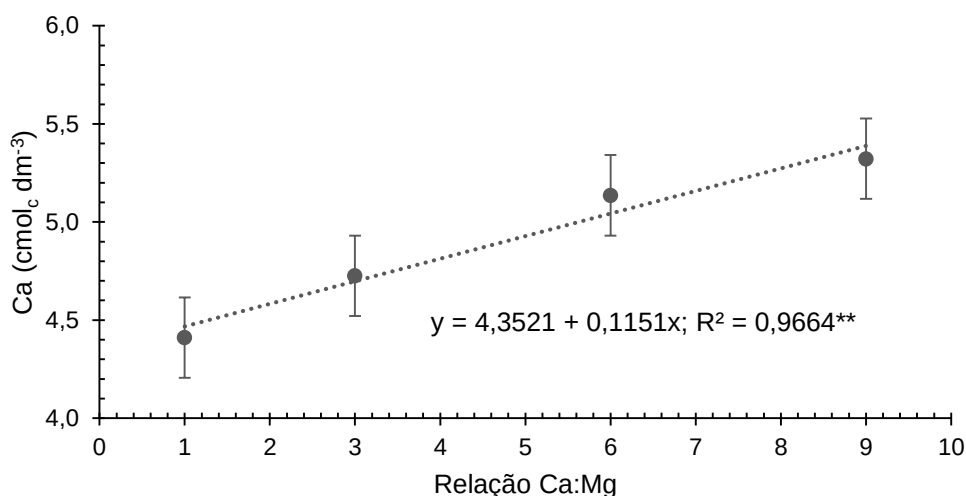
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 30 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

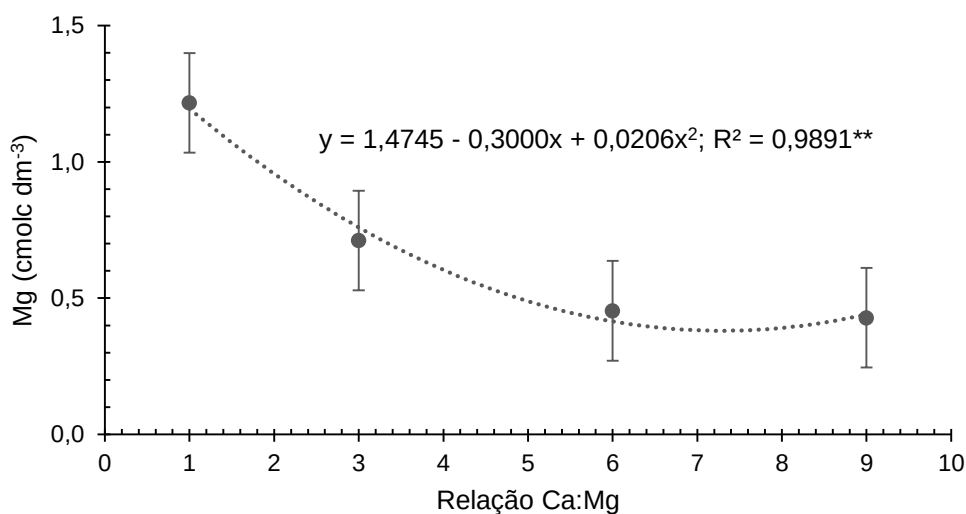


Fonte: O autor

Os teores de Mg trocável do solo não foram influenciados por status de água no solo (Tabelas 10 e 11) e o comportamento do referido nutriente foi descrito por um modelo quadrático em função das relações Ca:Mg no solo, tanto após o cultivo do genótipo IAC Foscari-31 (Figura 31) como após o cultivo do genótipo BMX Zeus IPRO (Figura 32). Os teores de Mg trocável variaram de 0,43 a 1,22 cmol_c dm⁻³ sob as relações Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente, após cultivo do cultivar IAC Foscari-31. Para o cultivar BMX Zeus IPRO, após o seu cultivo, os teores de Mg trocável flutuaram de 0,33 a 1,21 cmol_c dm⁻³ sob as relações Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente. Da mesma forma ao que foi observado com o Ca trocável, a redução na concentração de Mg trocável no solo pode ser atribuída ao incremento da quantidade de CaCO₃ em detrimento do MgCO₃ no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

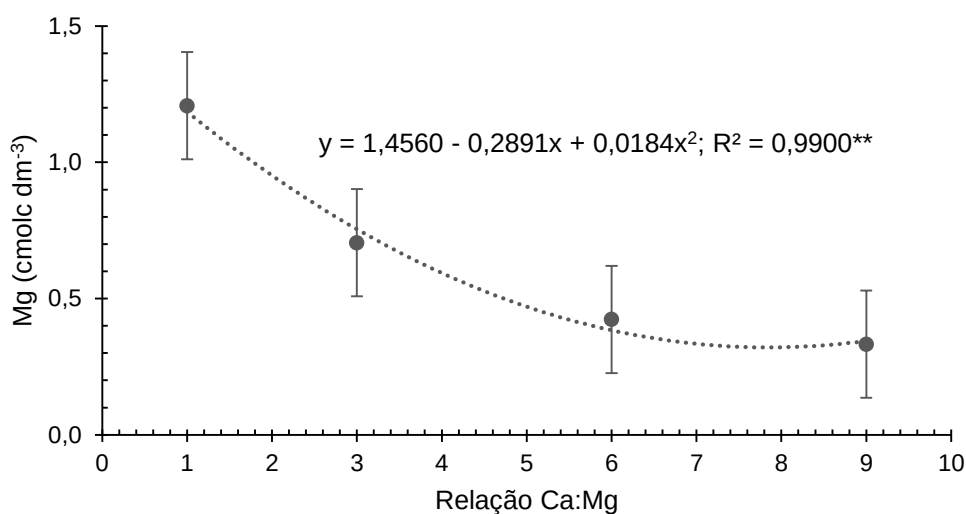
Uma redução linear dos teores de Mg trocável no solo foi observada por Luciano Junior (2018) em função das razões de Ca:Mg de 0,5:1; 1:1; 2:1; 4:1 e 8:1 após o cultivo do feijoeiro em condições de ambiente protegido. Os valores médios máximo e mínimo de Mg trocável foram de 5,9 e 2,1 cmol_c dm⁻³ sob as proporções Ca:Mg 8:1 e 0,5:1, respectivamente. Guimarães Júnior *et al.* (2013) não constataram influência significativa das relações Ca:Mg no solo 1:1, 2:1, 4:1, 6:1 e 8:1 sobre o teor de Mg trocável no solo mediante cultivo de três espécies forrageiras.

Figura 31 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 32 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

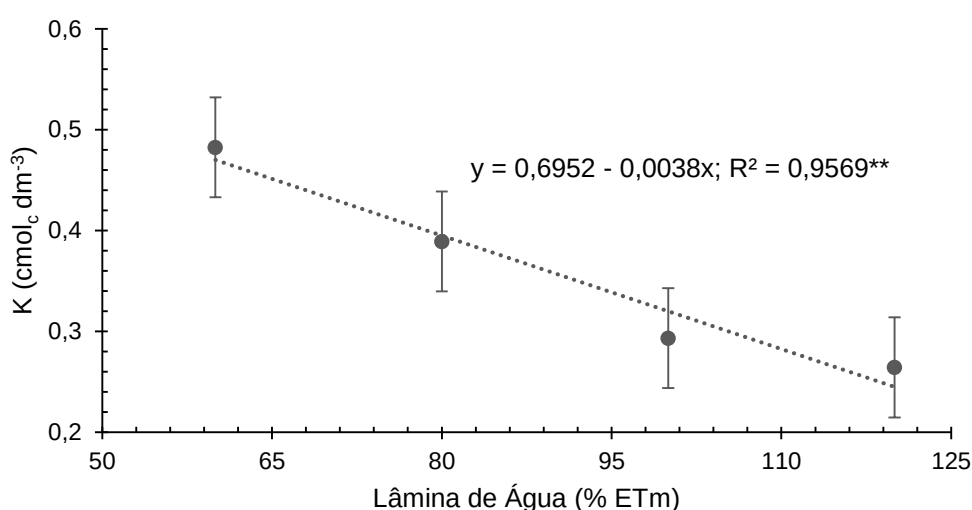
No que diz respeito aos teores de K trocável no solo, foi evidenciado efeito de suprimento hídrico do solo sobre a referida variável após cultivo de genótipos de soja IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO (Tabelas 10 e 11). Entretanto, o balanço catiônico no solo não influenciou significativamente os teores de K trocável no solo. Sob cultivo do cultivar de soja IAC Foscarin-31, os teores de K máximo e mínimo foram de 0,48 e 0,26 cmolc dm⁻³ sob 60 % da ETm e 120% da ETm, respectivamente (Figura 33). Para

o cultivo de soja BMX Zeus IPRO, os picos máximos e mínimos foram de 0,50 e 0,28 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ sob 60 % da ETm e 120% da ETm, respectivamente (Figura 34).

Os menores teores de K trocável no solo sob maiores níveis de água no solo estão relacionados à absorção do nutriente pelas plantas, a qual é facilitada pelo maior suprimento hídrico do solo. Essa dinâmica de absorção de K^+ pelas raízes das plantas é governada pelas condições hídricas do solo, revelando que o teor mais baixo de K trocável no solo é consequência de maior absorção deste nutriente pelas plantas, tendo em vista que o processo de contato íon-raiz da solução do solo para a rizosfera se dá preponderantemente por difusão e em menor magnitude por fluxo de massa (Raij, 2011), os quais dependem, por sua vez, do suprimento hídrico do solo.

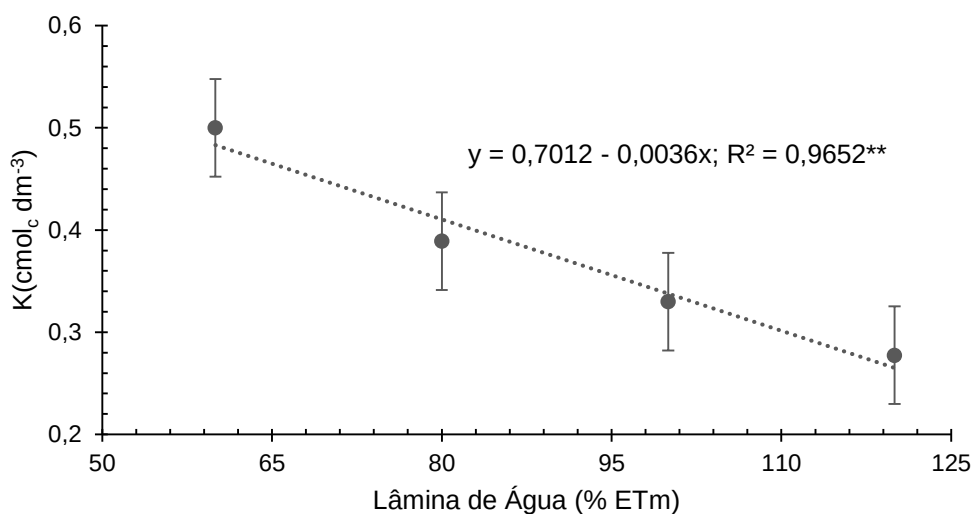
Resultado semelhante foi obtido por Medeiros *et al.* (2008) em experimento conduzido com milho sob ambiente protegido. Os teores de K trocável não diferiram estatisticamente entre si, com valores oscilando de 0,27 a 0,37 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ em função do balanço catiônico no solo. Efeito significativo de balanço catiônico sobre a concentração de K no solo não foi detectado por Guimarães Júnior *et al.* (2013) sob condições de cultivo de três espécies forrageiras no município de Araguaína, TO.

Figura 33 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar IAC Foscari-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 34 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

5.1.6 Atributos químicos da parte aérea

A extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 foi afetada pelo suprimento de água e pelo balanço catiônico no solo (Tabela 12). Efeito de interação entre os fatores níveis de água no solo e relações Ca:Mg também foi observado. Para a relação Ca:Mg 1:1, a absorção de Ca pelas plantas apresentou resposta quadrática sob a influência do status de água no solo, com valores variando de 0,16 g planta⁻¹ sob 60% da ETm a 0,31 g planta⁻¹ sob 100% da ETm (Figura 35). Para a relação Ca:Mg 3:1, a extração de Ca pelas plantas aumentou linearmente em função do status de água no solo, com valores oscilando de 0,15 a 0,31 g planta⁻¹ para aplicação de lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente. Para a relação Ca:Mg 6:1, a absorção de Ca pelas plantas não foi influenciada pelo suprimento de água no solo, com valor máximo de 0,21 g planta⁻¹ sob 60% da ETm e valor mínimo de 0,16 g planta⁻¹ sob 80 % e 120% da ETm. Para a relação Ca:Mg 9:1, a extração de Ca pelas plantas apresentou uma oscilação de 0,17 a 0,29 g planta⁻¹ em função das lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente.

Tabela 12 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de soja, cultivar IAC Foscarin-31 sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Extração de Ca	Extração de Mg	Extração de K
Água (W)		0,01582**	0,00328*	1,52943**
Ca:Mg (R)		0,00949*	0,00064 ^{ns}	0,65457**
W x R		0,00599*	0,00156 ^{ns}	0,25530*
C.V. (%)		21,27	32,11	13,42

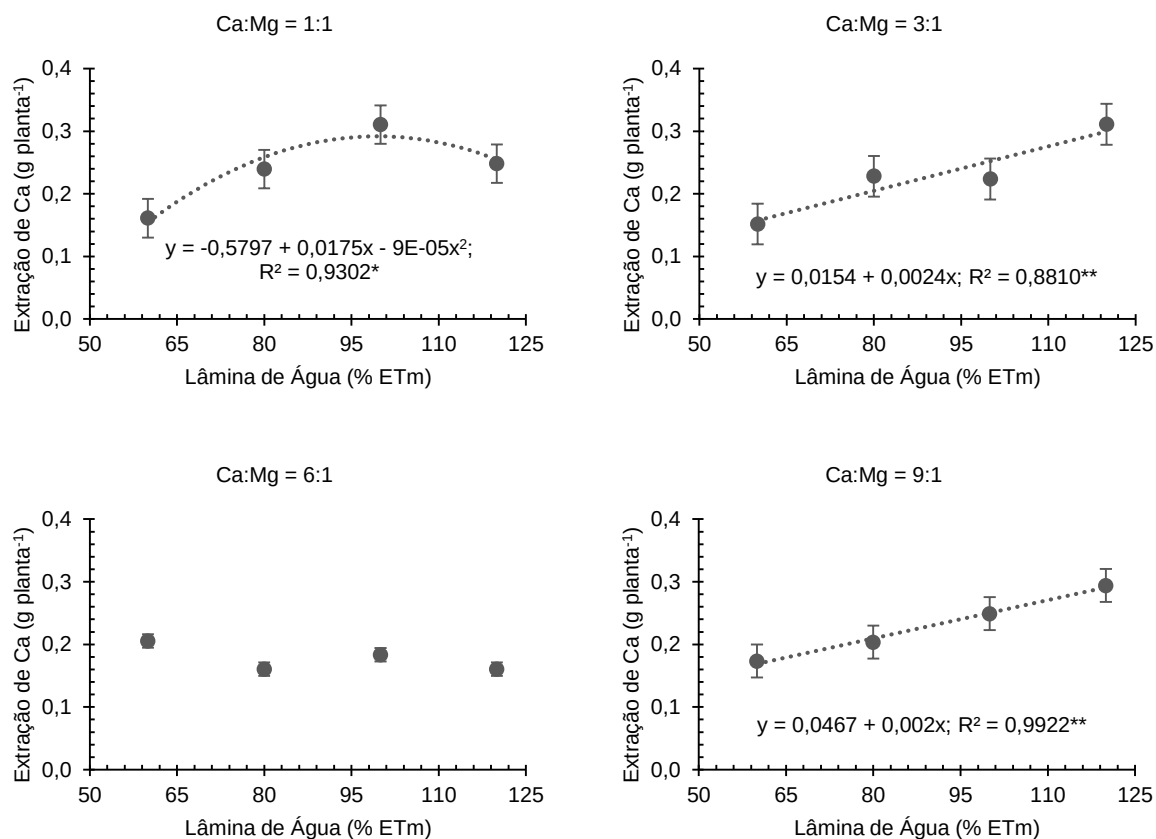
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 35 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

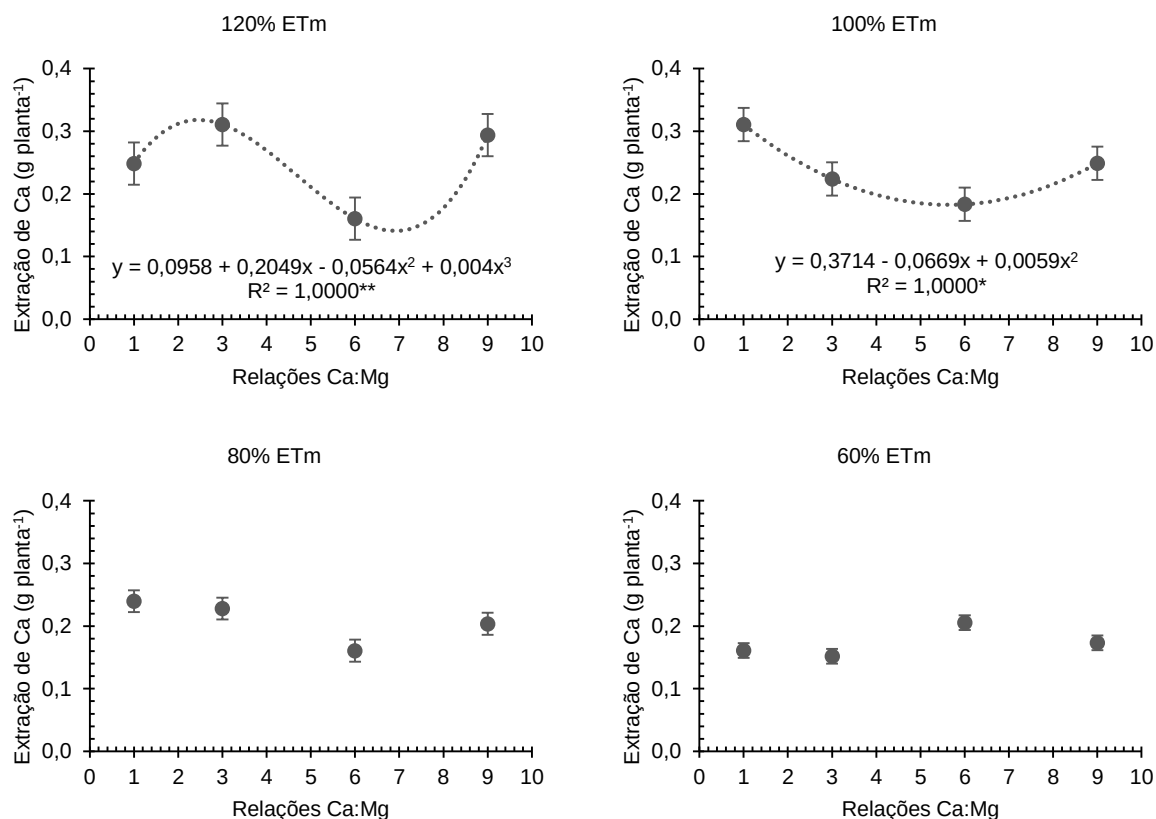


Fonte: O autor

Com relação aos níveis de água no solo correspondentes a 120% e 100% da ETm, a absorção de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 diferiu estatisticamente entre os tratamentos (Figura 36). Sob 120% da ETm, a resposta obtida não apresentou nenhum significado agrônomo ou prático. Um modelo de regressão quadrático descreveu a extração de Ca pelas plantas de soja em função

das relações Ca:Mg do solo para plantas submetidas ao tratamento com 100% da ETm, com valores máximo e mínimo de 0,31 g planta⁻¹ e 0,18 g planta⁻¹ sob balanço de cátions de 1:1 e 6:1, respectivamente.

Figura 36 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Para o cultivar BMX Zeus IPRO, a extração de Ca pelas plantas não foi afetada pelo balanço catiônico; contudo, essa variável-resposta foi governada pelo suprimento de água no solo (Tabela 13). Um modelo de regressão linear descreveu a absorção de Ca pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função do status de água no solo, com valores oscilando de 0,16 a 0,27 g planta⁻¹ sob aplicação de lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente (Figura 37).

Holzschuh (2007) observou que os teores de Ca na parte aérea de soja não foram condicionados pelas diferentes relações Ca:Mg do solo obtidas mediante aplicação de calcários calcítico e dolomítico em diferentes proporções. Este estudo foi conduzido a campo nos municípios de Santo Ângelo, Cruz Alta e São Gabriel, RS, sob aplicação da calagem de forma superficial e incorporada. Segundo o referido

autor, esses resultados demonstraram que, apesar das diferentes concentrações de Ca presentes no solo para cada combinação de CaCO_3 e MgCO_3 aplicada, o desempenho fitotécnico da soja não foi comprometido pelo balanço catiônico no solo, nem tampouco pela forma sob a qual a calagem foi efetuada.

Tabela 13 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Extração de Ca	Extração de Mg	Extração de K
Água (W)	3	0,00036**	0,00541**	3,08270**
Ca:Mg (R)	3	0,10284 ^{ns}	0,00019 ^{ns}	0,04487 ^{ns}
W x R	9	0,08087 ^{ns}	0,00023 ^{ns}	0,06006 ^{ns}
C.V. (%)		28,31	27,52	14,46

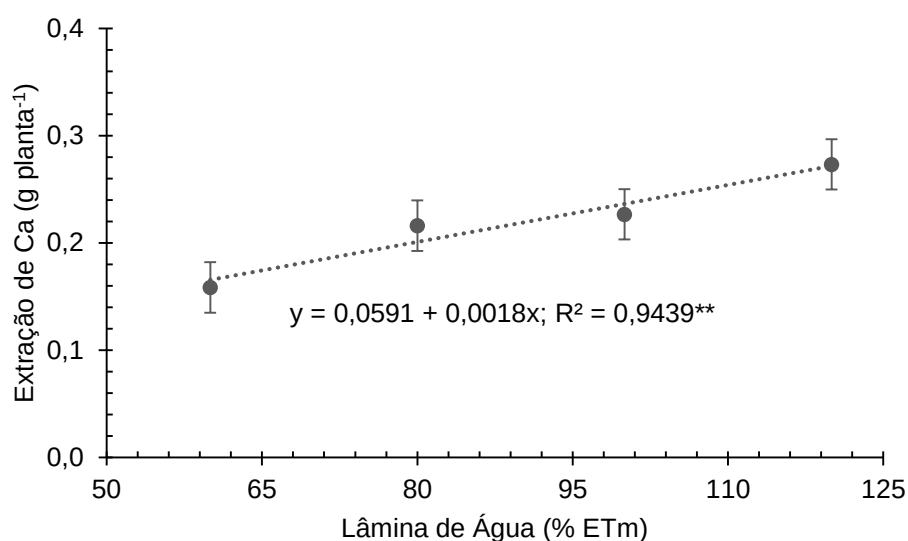
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 37 – Extração de Ca pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



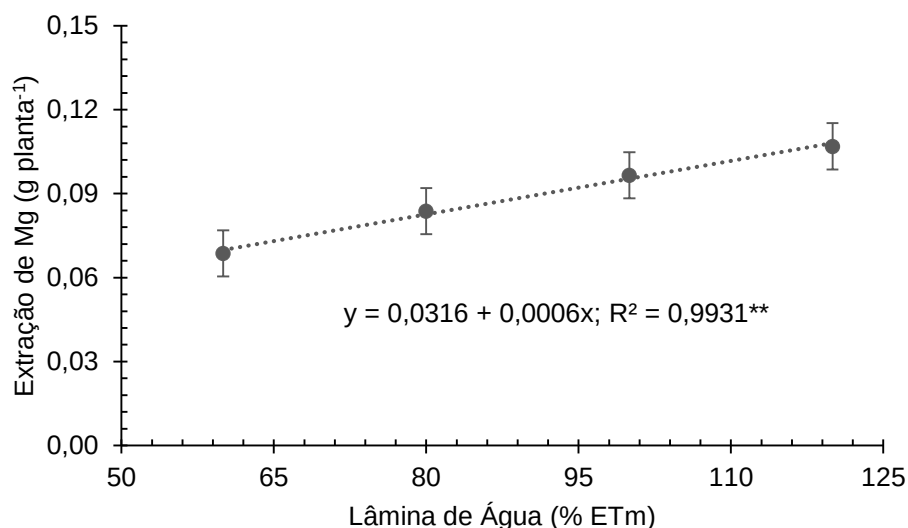
Fonte: O autor

Avaliando a influência das relações Ca:Mg no solo de 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 e 6:1 na absorção de Ca pelas plantas de soja em ambiente protegido, Lange *et al.* (2021) verificaram que a proporção 5:1 culminou em maior extração de Ca pela parte aérea das plantas. Os valores de Ca absorvido variaram entre 0,72 g planta⁻¹ sob relação Ca:Mg 5:1 e 0,32 g planta⁻¹ sob relação Ca:Mg 1:1. Oliveira e Parra (2003) observaram aumento, segundo modelo de regressão quadrático, na concentração de

Ca da matéria seca do feijoeiro em função das razões molares entre Ca e Mg de 0,5; 1; 2; 4; 6 e 8.

No que diz respeito à absorção de Mg pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31, não houve diferença significativa para este nutriente em função das relações Ca:Mg no solo (Tabela 12). Entretanto, houve efeito dos níveis de água no solo sobre a referida variável-resposta (Figura 38). Um aumento linear na extração de Mg pelas plantas foi verificado perante incremento do suprimento hídrico do solo, com valores mínimo e máximo de 0,07 e 0,11 g planta⁻¹ sob 60% e 120% da ETm, respectivamente.

Figura 38 – Extração de Mg pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



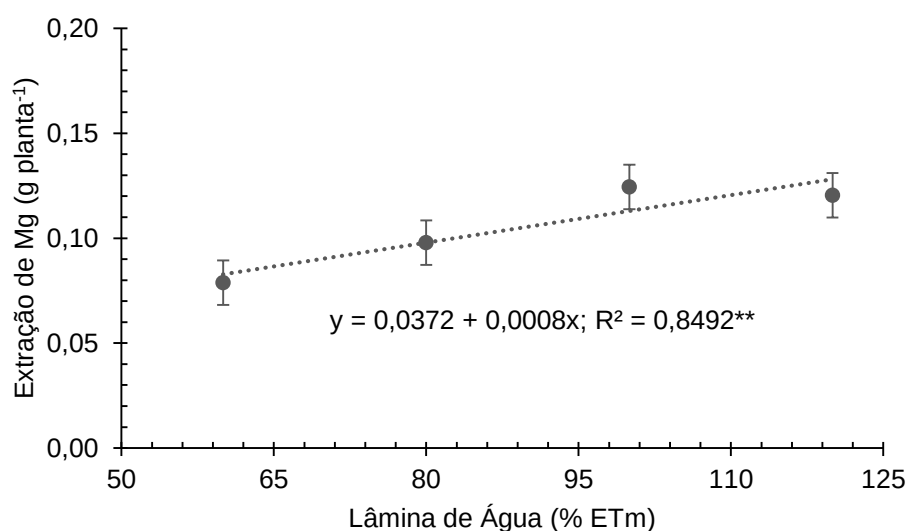
Fonte: O autor

A absorção de Mg pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO não foi afetada em função do balanço catiônico no solo, porém a referida variável-resposta foi condicionada pelo status de água no solo (Tabela 13). A relação de dependência entre extração de Mg e disponibilidade de água no solo foi expressa por um modelo de regressão linear (Figura 39). Os valores mínimo e máximo da extração de Mg pelas plantas oscilaram de 0,08 a 0,13 g planta⁻¹ sob 60% e 120% da ETm, respectivamente, para as condições de cultura e genótipo em estudo.

O teor de Mg no tecido vegetal de soja encontrado por Holzschuh (2007) não foi afetado pelo balanço de cátions, mesmo mediante calagem no solo efetuada com diferentes proporções de calcário calcítico e dolomítico. Analisando a influência de

diferentes razões molares sobre a extração de Mg pelas plantas de soja, Lange *et al.* (2021) verificaram que as espécies submetidas à relação Ca:Mg 2:1 apresentaram maior absorção do referido nutriente. O valor correspondente à maior absorção de Mg foi de 0,37 g planta⁻¹ sob relação Ca:Mg 2:1 e o menor valor foi de 0,25 g planta⁻¹ sob relação Ca:Mg 6:1. Uma redução conforme o modelo quadrático da concentração de Mg da matéria seca de feijoeiro foi constatada por Oliveira e Parra (2003) em função do aumento da relação Ca:Mg no solo.

Figura 39 – Extração de Mg pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

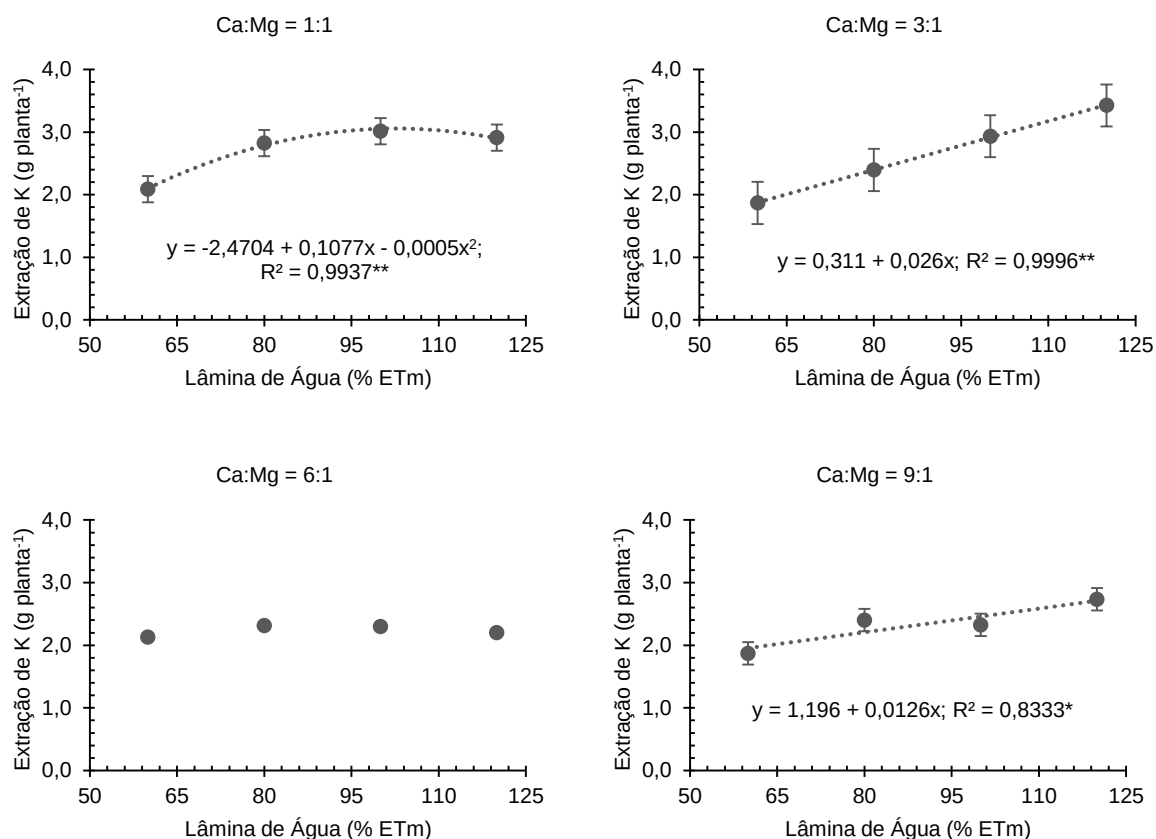


Fonte: O autor

A extração de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 foi influenciada significativamente pelos níveis de água no solo, pela relação Ca:Mg no solo e pela interação entre os tratamentos (Tabela 12). Na relação Ca:Mg 1:1, a absorção de K pelas plantas apresentou resposta quadrática sob o efeito do status de água no solo, com valores oscilando de 2,09 g planta⁻¹ sob 60% da ETm a 3,01 g planta⁻¹ sob 100% da ETm (Figura 40). Na relação Ca:Mg 3:1, um aumento linear da extração de K foi observado em função do incremento do status de água no solo, com valores variando de 1,87 a 3,43 g planta⁻¹ mediante aplicação de lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente. Na relação Ca:Mg 6:1, a absorção de K pelas plantas não foi condicionada pelo suprimento de água no solo. Na relação Ca:Mg 9:1, a extração de K pelas plantas aumentou linearmente com o incremento da disponibilidade hídrica, apresentando uma oscilação de 1,87 a 2,74 g

planta⁻¹ em função das lâminas de irrigação correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente.

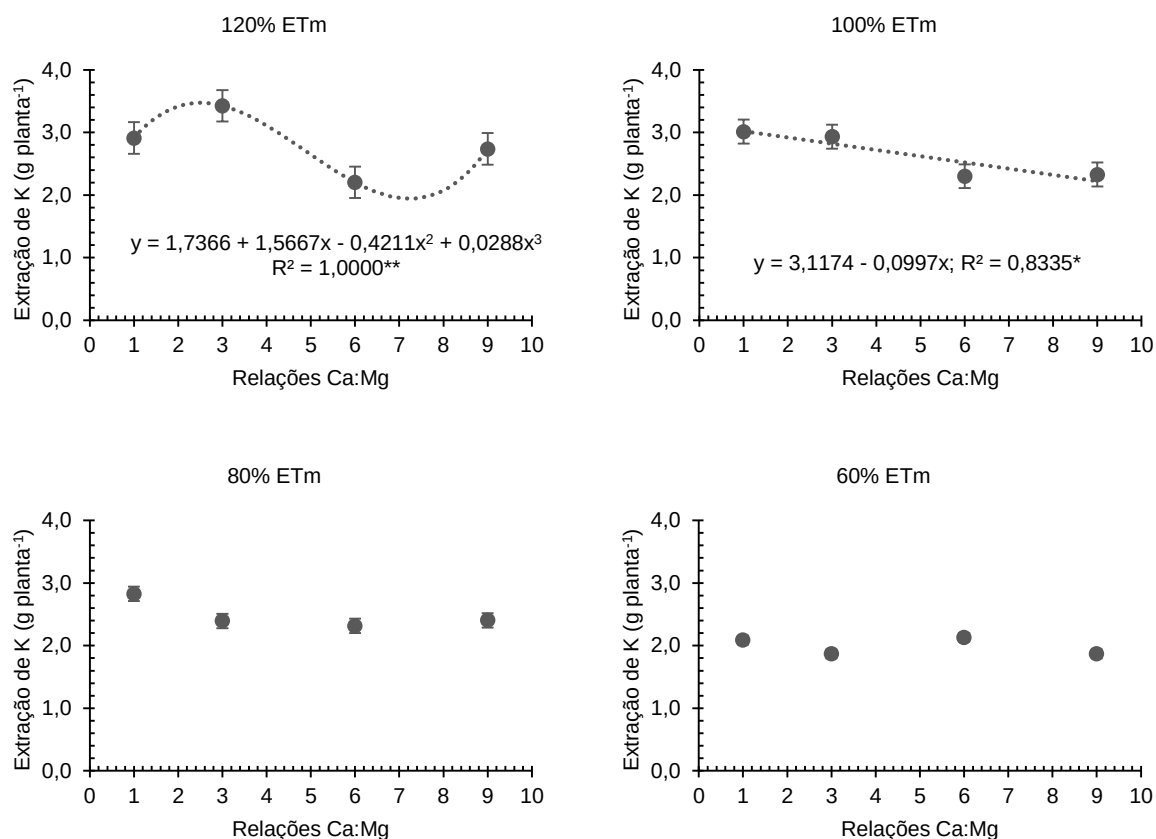
Figura 40 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com relação ao status de água no solo sob o nível de suprimento hídrico correspondente a 120% da ETm, a absorção K pelas plantas de soja foi descrita por um modelo de regressão de terceiro grau, o qual não expressa significado agrônômico ou prático (Figura 41). Sob o nível de água no solo de 100% da ETm, a extração de K em função da relação Ca:Mg foi descrita por um modelo de regressão linear simples, com valores oscilando de 2,30 a 3,01 g planta⁻¹ sob relações Ca:Mg 6:1 e 1:1, respectivamente. Para os níveis de suprimento hídrico de 80% e 60% da ETm, a absorção de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 não foi governada pela relação Ca:Mg no solo.

Figura 41 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar IAC Foscarin-31 em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.

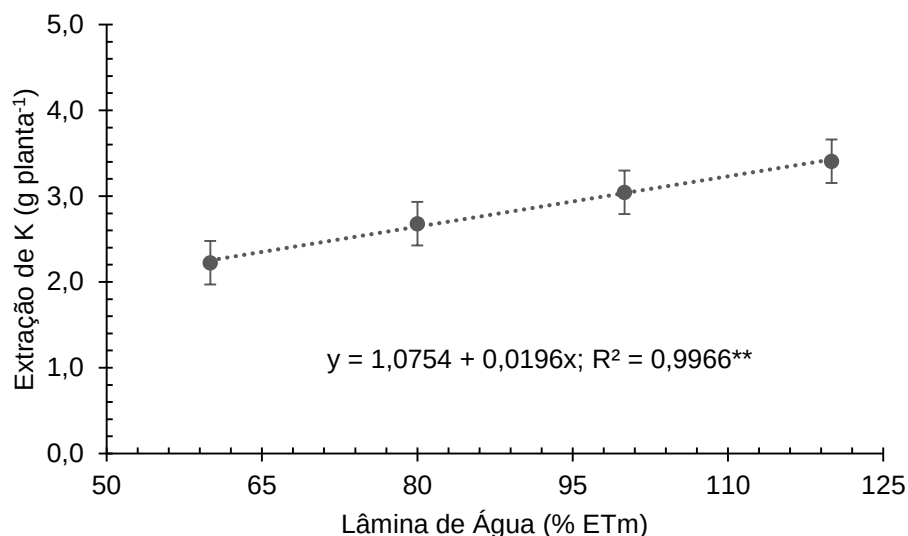


Fonte: O autor

Não houve efeito do balanço catiônico no solo sobre a extração de K pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO; porém a absorção de K foi influenciada pela disponibilidade hídrica no solo (Tabela 13). Um modelo de regressão linear descreveu a extração de K pelas plantas em função do status de água no solo, com valores extremos de 3,41 e 2,22 g planta⁻¹ sob 120% e 60% da ETm, respectivamente (Figura 42).

Examinando o efeito do balanço catiônico sobre os teores foliares da cultura da soja, Salvador; Carvalho e Lucchesi (2011) observaram influência da relação Ca:Mg no solo sobre a concentração de K no tecido vegetal. Os referidos autores utilizaram um tratamento controle e as razões molares de 1:0, 10:1, 3:1, 1:1, 1:3, 1:10 e 0:1. A relação Ca:Mg no solo 3:1 proporcionou maior teor de K foliar em plantas de soja com valor médio em torno de 50 g kg⁻¹. Os menores teores de K nas folhas de soja foram obtidos sob relações Ca:Mg no solo de 1:3 e 0:1, com valores médios inferiores a 30 g kg⁻¹.

Figura 42 – Extração de K pelas plantas de soja do cultivar BMX Zeus IPRO em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

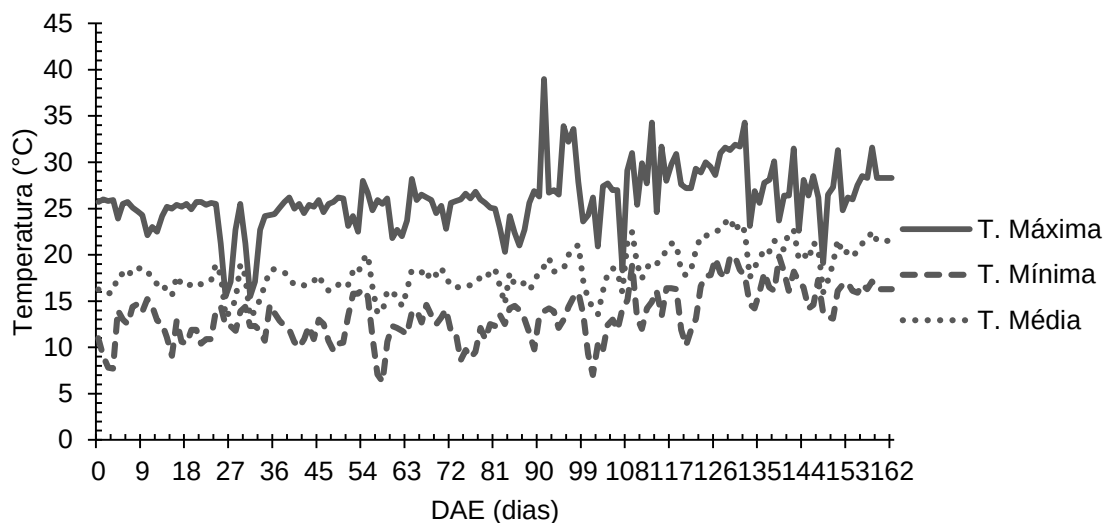
A concentração de K na matéria seca de feijoeiro encontrada por Oliveira e Parra (2003) em condições de ambiente protegido não foi afetada pelas razões molares entre Ca e Mg do solo. Os teores médios oscilaram entre 26,3 e 28,8 g kg⁻¹ sob relações Ca:Mg do solo de 2:1 e 1:1, respectivamente, em plantas de feijoeiro cultivadas em um Latossolo Vermelho distrófico. Sob cultivo em um Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, a concentração de K em plantas de feijoeiro variou de 26,4 g kg⁻¹, sob relação Ca:Mg 2:1, a 30,5 g kg⁻¹ sob relação Ca:Mg 1:1.

5.2 CULTURA DA CEVADA

5.2.1 Condições climáticas

Os valores relativos às temperaturas máxima, mínima e média e umidade relativa no interior da casa de vegetação foram obtidos durante todo o ciclo da cultura, desde a emergência à colheita da cevada. Na Figura 43 são ilustradas as temperaturas máxima, mínima e média medidas no interior da casa de vegetação ao longo de todo o ciclo de cultivo das plantas de cevada. A temperatura média do ar compreendida durante as fases de florescimento e enchimento de grãos foi em torno de 19,3°C. Porém, a temperatura máxima durante quase todo o período relacionado a estes estádios fenológicos foi inferior a 30°C, o que representa exigências térmicas mais adequadas para plantas de metabolismo C₃ (Kerbaudy, 2004).

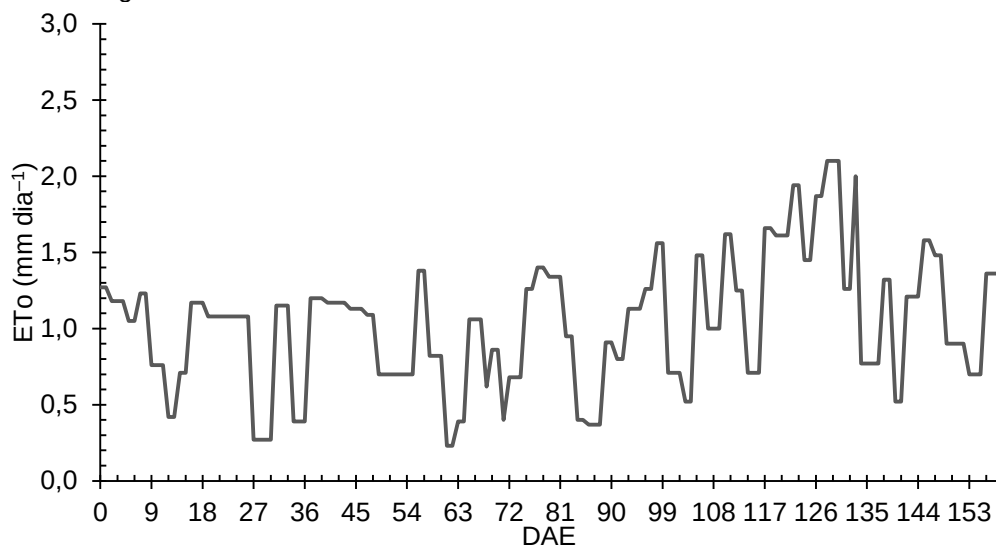
Figura 43 – Regime de temperatura do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento da cevada. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.



Fonte: O autor

As variações de ETo durante o desenvolvimento das plantas de cevada cultivadas em condições de ambiente protegido estão demonstradas na Figura 44. A ETo acumulada durante todo o ciclo da cultura foi de 164,58 mm, com variação de 2,10 mm dia⁻¹ no período compreendido entre 23 e 25 de setembro de 2023 a 0,23 mm dia⁻¹ em 18 e 19 de julho de 2023 ao longo do experimento 2 conduzido com a cultura da cevada.

Figura 44 – Valores médios diários das taxas de evapotranspiração de referência (ETo) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de cevada cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.

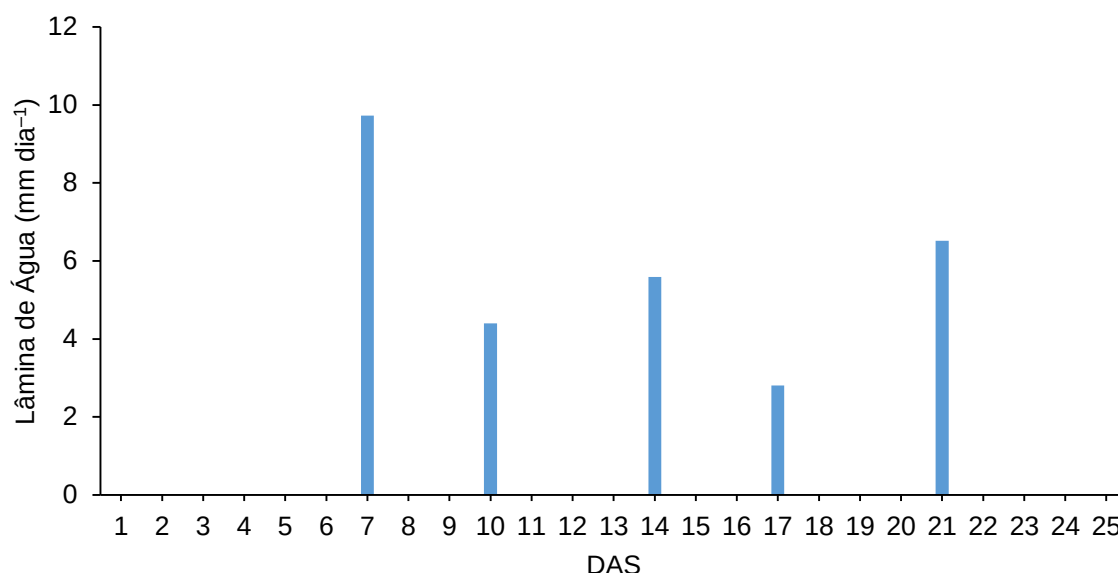


Fonte: O autor

5.2.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo

Na Figura 45 são mostradas as quantidades de água irrigada nos vasos antes da definição dos tratamentos de água no solo. Durante esse período, todos os vasos receberam a lâmina de água necessária para manter o conteúdo de água no solo em torno da capacidade de vaso. A lâmina média total de água aplicada neste período foi de 29,0 mm. Após aplicação dos tratamentos de água, cada vaso recebeu frações específicas da lâmina ideal de água de irrigação de acordo com os tratamentos propostos no experimento 2.

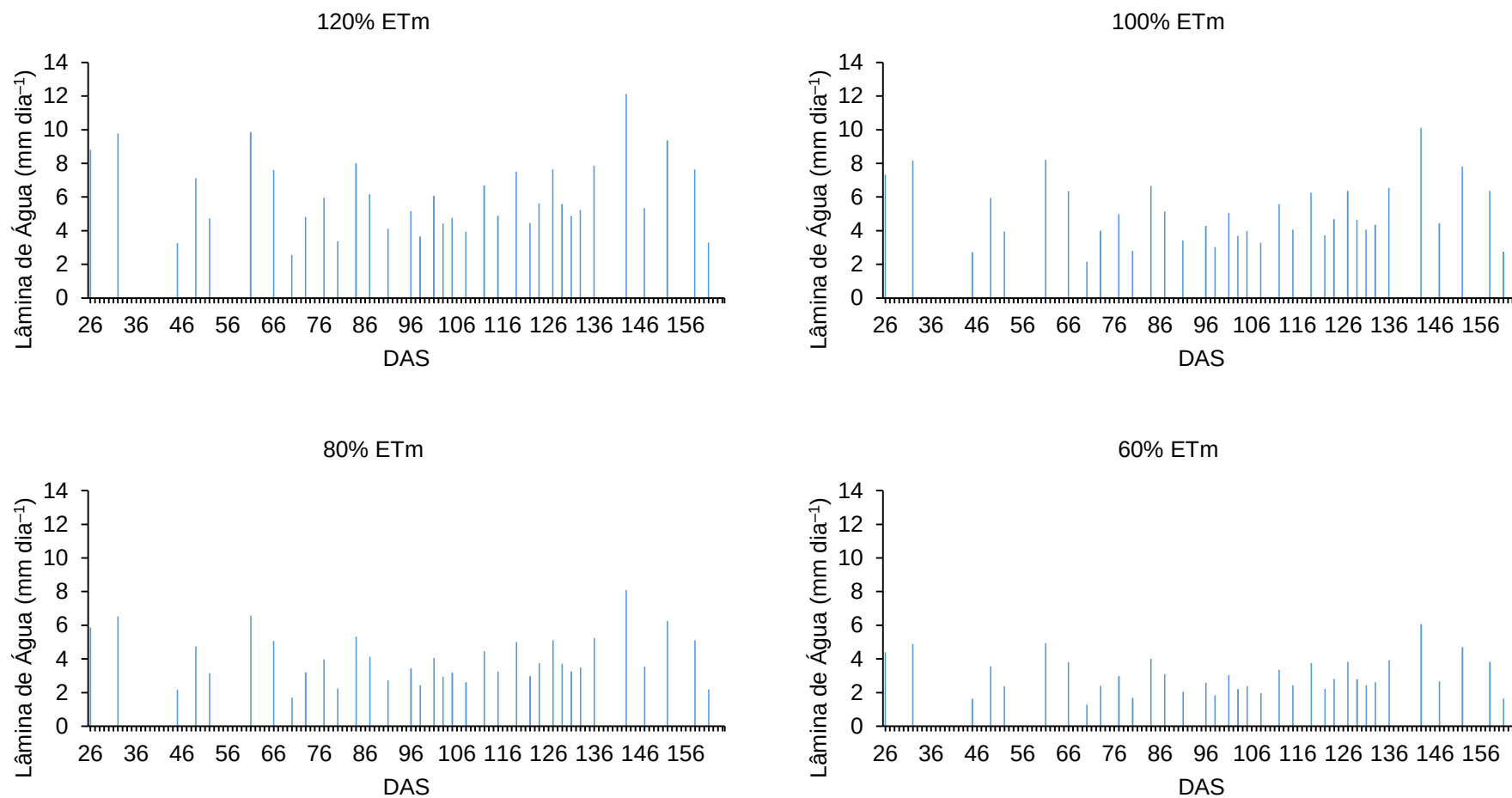
Figura 45 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de cevada cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.



Fonte: O autor

A Figura 46 mostra as diferentes lâminas totais de irrigação aplicadas após a definição dos tratamentos referentes aos níveis de água no solo determinados. A quantidade de água aplicada em cada vaso foi diferente entre os tratamentos, definida em função das diferentes frações de ET_m obtida por meio da pesagem dos vasos. Os vasos receberam as seguintes lâminas de irrigação: 212,3; 176,9; 141, e 106,1 mm, respectivamente, para 120, 100, 80 e 60% da ET_m. O número de eventos de irrigação foi o mesmo para todos os tratamentos referentes aos níveis de água no solo.

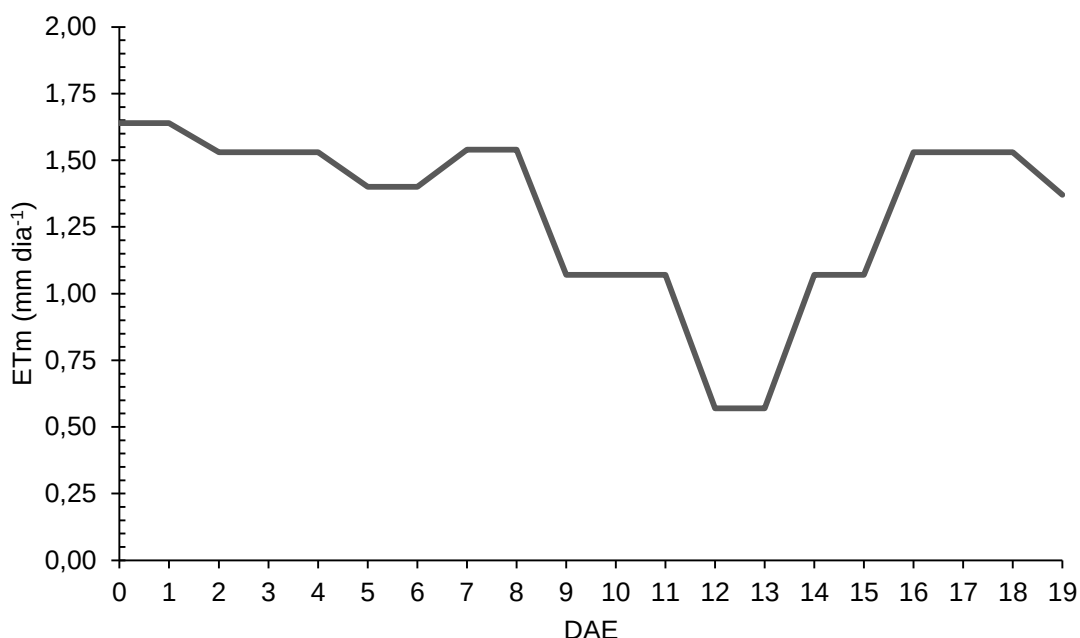
Figura 46 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento da cultura de cevada em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

O consumo hídrico médio diário da cultura da cevada antes da aplicação dos tratamentos referente ao suprimento hídrico está descrito na Figura 47. Nos primeiros dias após a emergência, o consumo hídrico permaneceu constante, porém uma redução nos valores foi observada nos dias seguintes. Essa redução está relacionada às menores temperaturas registradas nesses dias. O consumo hídrico foi maior nos primeiros dias após a emergência, com valor médio de 1,64 mm. Neste período o valor médio do consumo hídrico foi de 1,31 mm com valor acumulado de 26,2 mm.

Figura 47 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura da cevada sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



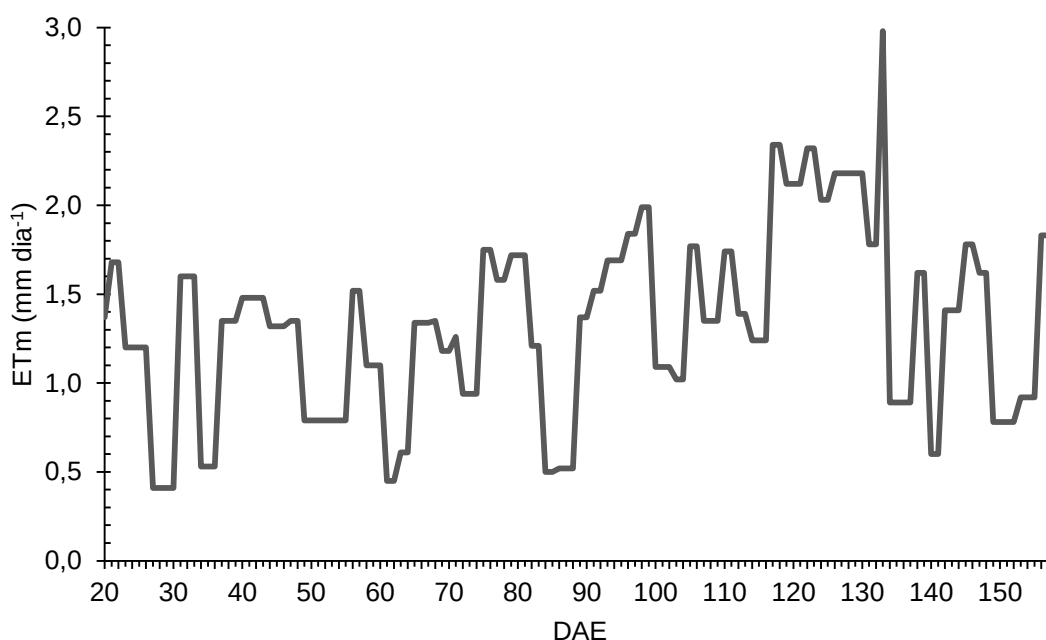
Fonte: O autor

A Figura 48 ilustra o consumo hídrico médio das plantas de cevada após a aplicação dos tratamentos de água. Esse consumo hídrico ocorreu sob condições de suprimento hídrico adequado no solo. Como demonstrado na Figura 48, após aplicação dos tratamentos de níveis de água no solo, observa-se uma grande variação no consumo de água pelas plantas devido as condições climáticas no interior da estufa agrícola durante este subperíodo de desenvolvimento da cultura. Segundo Caeirão, Cunha e Pires (2009), estresses hídricos moderados exercem pequena influência sobre o crescimento vegetativo da cevada, mas comprometem a formação dos primórdios florais. Estresses severos ou mais prolongados podem resultar na

paralisação da diferenciação floral, limitando a formação de colmos férteis (Caeirão; Cunha; Pires, 2009).

O consumo hídrico diário médio foi de 1,34 mm, com valor acumulado durante o subperíodo de desenvolvimento de 185,76 mm. As maiores taxas de consumo hídrico foram alcançadas durante as fases de florescimento e enchimento de grãos.

Figura 48 – Consumo hídrico ideal diário (ETm) da cultura da cevada desde o desenvolvimento vegetativo até a maturação das plantas em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.

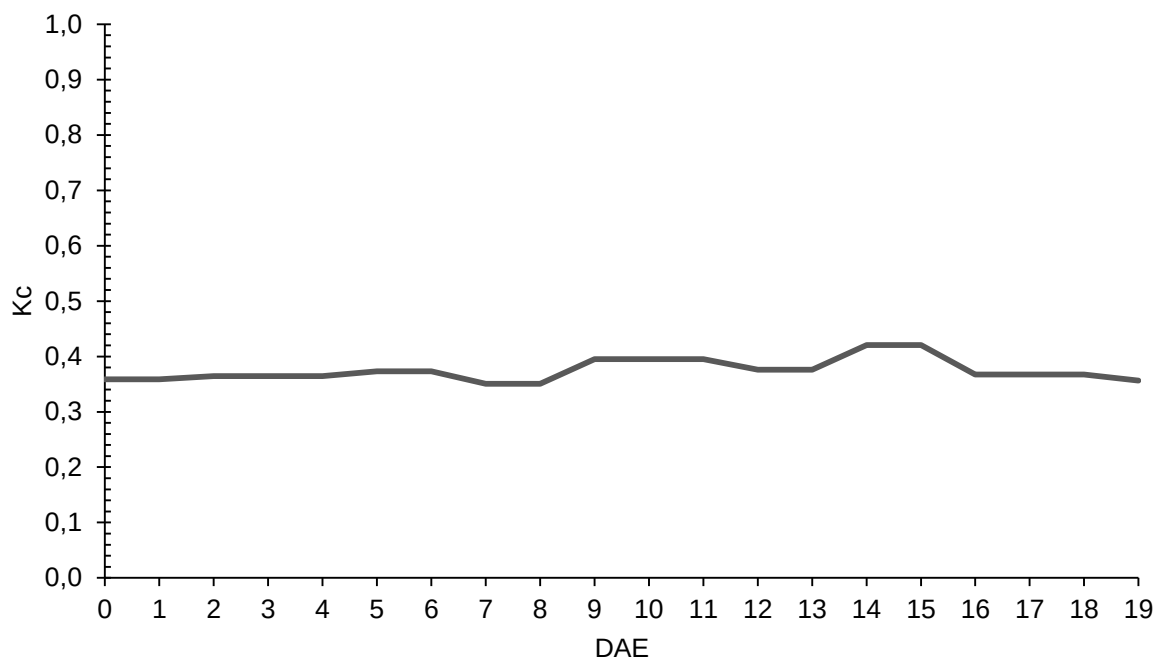


Fonte: O autor

Na Figura 49 está ilustrado o Kc da cultura da cevada durante o início do seu desenvolvimento. Os valores de Kc da cevada durante este subperíodo foram praticamente constantes devido ao baixo índice de área foliar nesta fase de desenvolvimento. As plantas de cevada apresentaram valores de Kc que oscilaram de 0,35 a 0,42, fase que antecedeu a aplicação dos tratamentos de água.

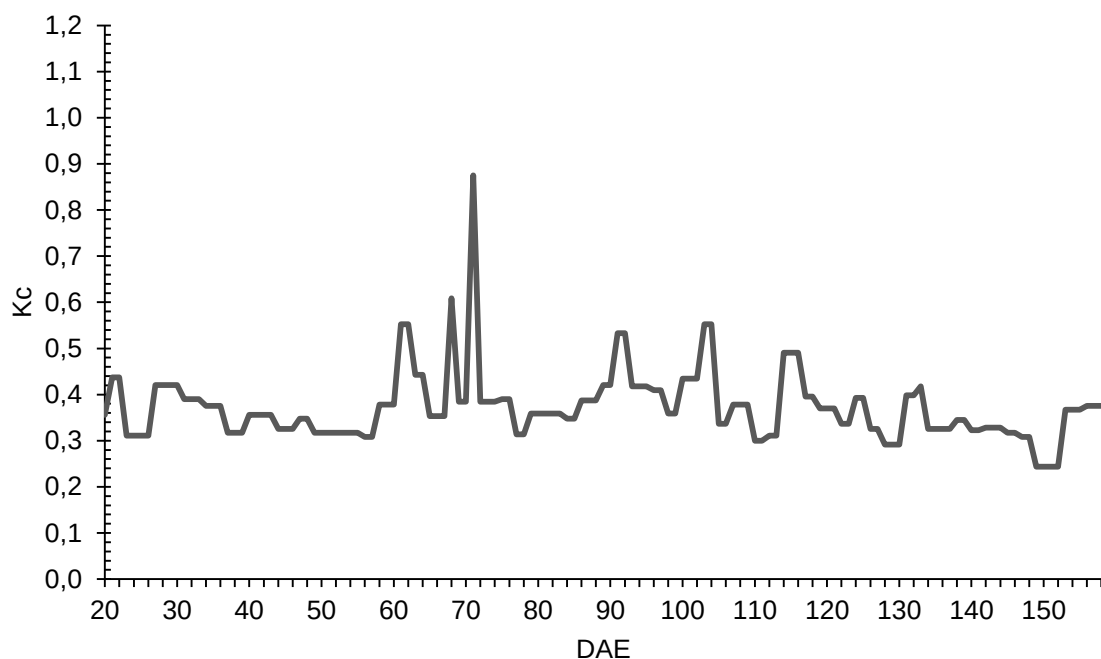
Os valores médios diários de Kc aferidos após aplicação dos tratamentos de água são descritos na Figura 50. Durante o cultivo da cevada, os maiores valores de Kc foram obtidos durante a fase de florescimento e enchimento de grãos, fase de maior exigência hídrica da cultura, atingindo um valor de 0,87. No final do ciclo, fase de maturação com a queda de folhas, os valores de Kc decresceram, assumindo valor de 0,24.

Figura 49 – Variação do consumo hídrico relativo (K_c) entre a semeadura, a germinação e a emergência da cevada cultivada em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Figura 50 – Variação do consumo hídrico relativo (K_c) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo e formação da produção da cevada cultivada em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

5.2.3 Altura de plantas e número de perfilhos

Na Tabela 14 são apresentadas as variáveis fitotécnicas altura de plantas e número de perfilhos por planta de cevada. A altura de plantas foi afetada significativamente pelos níveis de água no solo, porém não foi condicionada pelo balanço catiônico. Essa variável-resposta também apresentou efeito de interação entre status de água no solo e balanço catiônico no solo. A Figura 51 ilustra o comportamento de altura de plantas em função do status de água no solo para cada relação Ca:Mg. Na relação Ca:Mg 1:1 um comportamento quadrático foi descrito em função do suprimento hídrico do solo com valores máximos e mínimos de 56,2 cm e 48,0 cm obtidos sob 100% e 60% da ETm, respectivamente. Um modelo de regressão quadrático em função dos níveis de água no solo também foi observado para a relação Ca:Mg 3:1 com um valor máximo de 56,7 cm para 120% da ETm e 43,3 cm para 80% da ETm. Sob a relação Ca:Mg 6:1 a altura de plantas aumentou linearmente em função do status de água no solo, com valores máximo e mínimo de 55,4 cm e 45,6 cm para 120% e 60% da ETm, respectivamente.

Tabela 14 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para altura de plantas e número de perfilhos em população de plantas de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios	
		Altura de Plantas	Número de Perfilhos
Água (W)	3	147,4567**	21,9803**
Ca:Mg (R)	3	17,3933 ^{ns}	1,5537 ^{ns}
W x R	9	25,3522*	1,7661 ^{ns}
C.V. (%)		6,39	17,49

^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

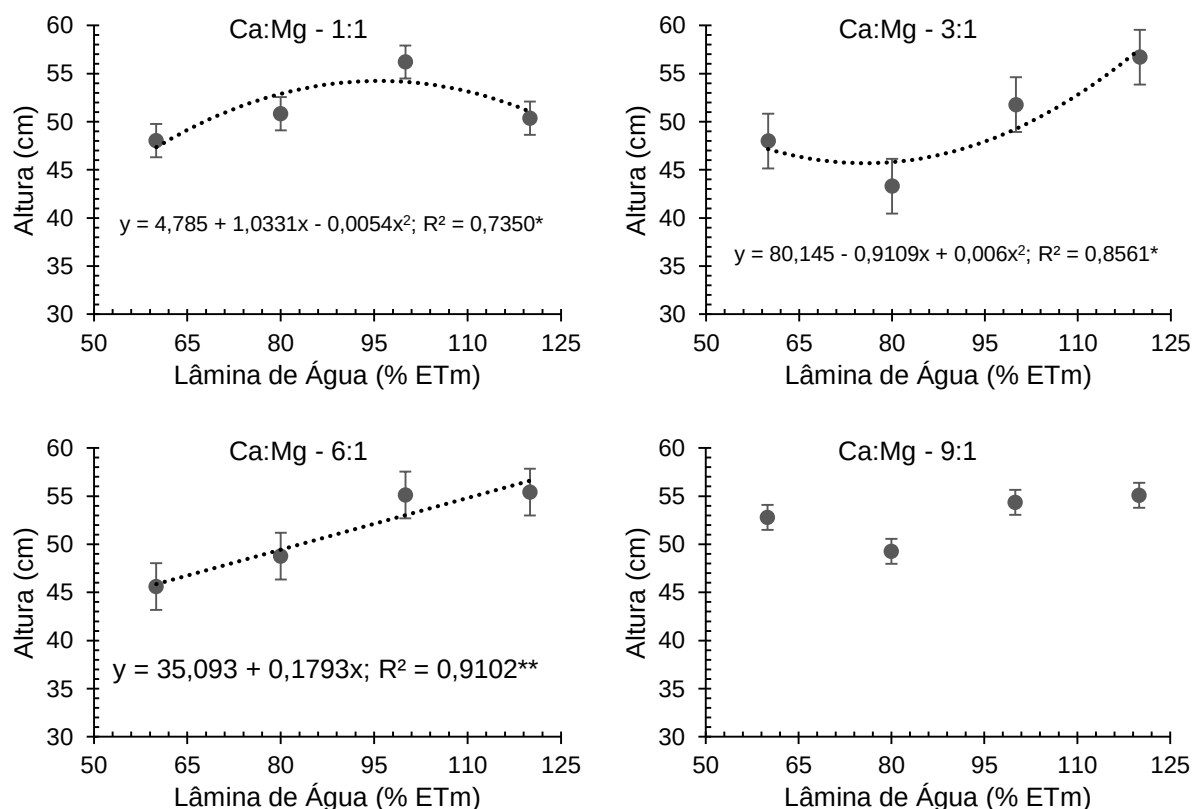
Fonte: O autor

Examinando a influência de quatro diferentes lâminas de água (50, 75, 100 e 125% da ETm) sobre o rendimento biológico dos cultivares de cevada BRS Sampa, BRS Manduri e BRS 195, Sanches *et al.* (2015) verificaram resposta quadrática pertinente ao efeito dos tratamentos de água sobre a altura de plantas. A altura de plantas do cultivar BRS Sampa oscilou de 48,02 a 64,47 cm, sob 50% e 100% da ETm, respectivamente. Os valores máximo e mínimo da altura de plantas do cultivar BRS Manduri foram de 68,13 e 50,06 cm, sob 125% e 50% da ETm, respectivamente.

Quanto ao cultivar BRS 195, o maior valor de altura de plantas foi de 68,44 cm sob 125% da ETm e o menor valor foi de 49,00 cm sob 50% da ETm.

Com a finalidade de avaliar a resposta fitotécnica da cevada em condições de campo no Irã sob o efeito do déficit hídrico e fertilização nitrogenada, Jahromi, Razzaghi e Zand-Parsa (2023) conduziram um experimento durante as estações de crescimento de 2013-2014 e 2014-2015. As lâminas de água aplicadas foram 0% ($I_{0\%}$), 50% ($I_{50\%}$), 75% ($I_{75\%}$) e 100% ($I_{100\%}$) das exigências hídricas da cultura. O tratamento $I_{0\%}$ não foi irrigado durante o ciclo da cultura. Os tratamentos $I_{50\%}$, $I_{75\%}$ e $I_{100\%}$ foram, após a semeadura, irrigados com 100 mm até o estabelecimento completo da cultura. A aplicação dos tratamentos de água foi iniciada 133 e 140 dias após a semeadura para o primeiro e o segundo ano agrícola, respectivamente. A altura de planta foi afetada em função dos tratamentos de água, com valores médios oscilando de 41,9 a 103,0 cm para $I_{0\%}$, e $I_{100\%}$, respectivamente para o primeiro ano agrícola. No segundo ano agrícola a altura de plantas de cevada variou de 45,8 a 106,6 cm para $I_{0\%}$, e $I_{100\%}$, respectivamente.

Figura 51 – Altura de plantas de cevada em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

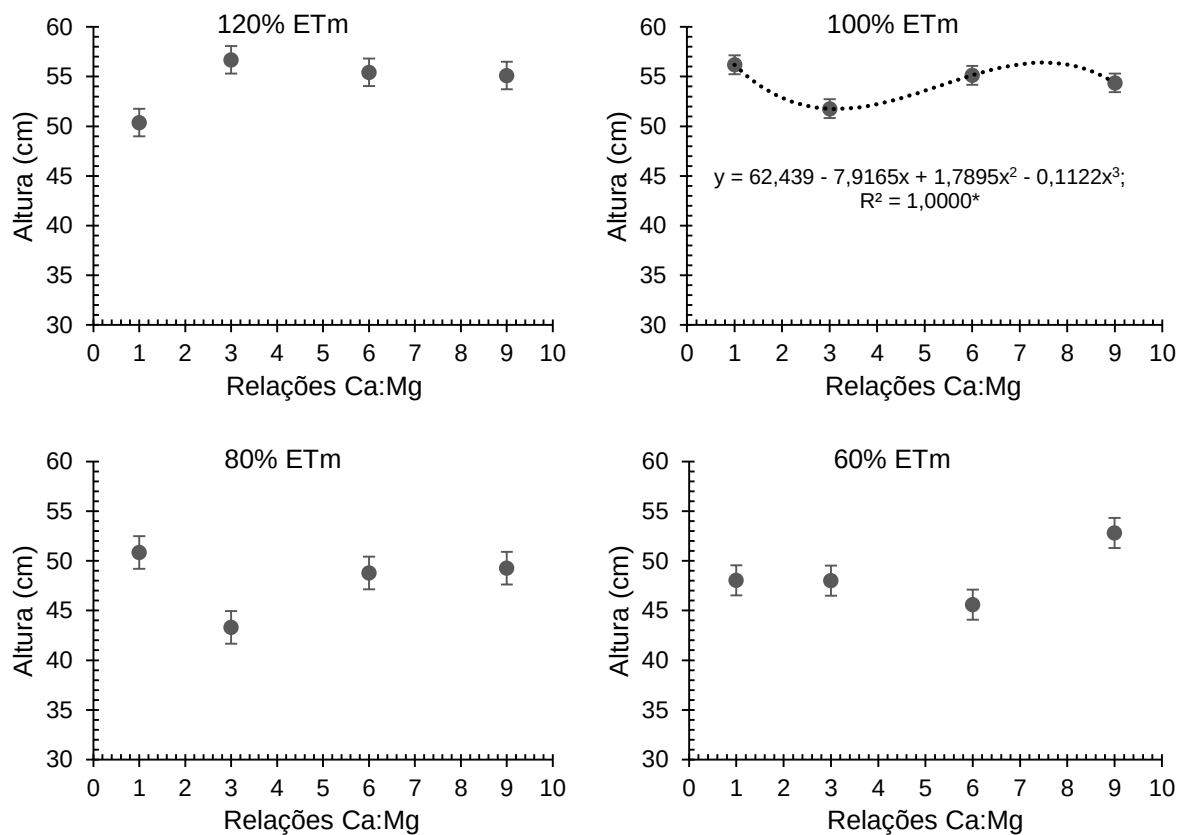
Em um experimento conduzido em casa de vegetação, D. dos Santos *et al.* (2012) avaliaram o efeito do déficit hídrico sobre as variedades de trigo CD 105, CD 111 e CD 108. Os tratamentos de água eram dois regimes hídricos: irrigação durante o ciclo de cultivo e déficit hídrico no início do florescimento pelo período de dez dias. O tratamento referente ao estresse hídrico nas plantas reduziu significativamente a altura de plantas dos cultivares CD 111 e CD 108. Este estudo demonstra o efeito isolado do status de água no solo sobre o desempenho fitotécnico dos cereais de inverno. A altura de plantas de CD 111 variou de 61,0 a 58,6 cm sob situação de suprimento adequado de água no solo e condição de déficit hídrico, respectivamente. Para o cultivar CD 108, os valores médios oscilaram de 55,8 a 50,6 cm em regime de irrigação durante todo o ciclo e condição de déficit hídrico no início do florescimento, respectivamente.

Avaliando o efeito de três níveis de irrigação (lâminas de água de 0, 20 e 40 mm) sobre quatro cultivares de cevada (BARI-Barley-1, BARI Barley-2, BHL-3 e BL-1) Mollah e Paul (2011) observaram diferença para altura de plantas. Os valores médios foram de 86,12 cm, 81,77 cm e 74,69 cm para lâminas de água de 40 mm, 20 mm e 0 mm, respectivamente.

Com relação ao fator suprimento de água no solo, somente o nível de 100% da ET_m exerceu efeito significativo sobre a altura de plantas em função das relações Ca:Mg. Porém, nenhum significado agrônomo prático pode ser demonstrado por modelos de regressão de terceiro grau, conforme ilustra a Figura 52.

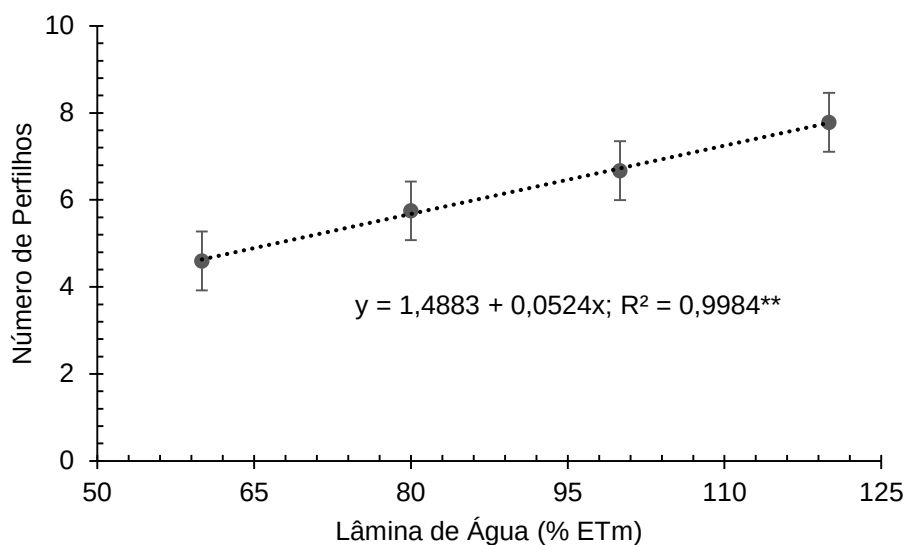
O número de perfilhos de plantas de cevada não foi afetado pelo balanço catiônico no solo, porém foi influenciado pelos níveis de suprimento hídrico do solo (Tabela 14). Essa variável demonstrou um incremento linear com a crescente disponibilidade de água no solo (Figura 53). Os valores oscilaram de 4,6 a 7,8 para lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ET_m, respectivamente.

Figura 52 – Altura de plantas de cevada em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



Fonte: O autor

Figura 53 – Número de perfilhos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Analisando o efeito das lâminas de irrigação 50%, 75%, 100% e 125% da ETm sobre desempenho fitotécnico dos cultivares de cevada BRS Sampa, BRS Manduri e

BRS 195, Sanches *et al.* (2015), obtiveram uma resposta linear para número de perfilhos por planta em ambos os genótipos. O número de perfilhos por planta de BRS Sampa oscilou de 2,03 a 3,69 para lâminas de água correspondentes a 50% e 125% da ET_m, respectivamente. Com relação ao genótipo BRS Manduri, os valores máximos e mínimos de número de perfilhos por planta foram de 2,13 e 2,72 para 75% e 125% da ET_m, respectivamente. Considerando o cultivar BRS 195, o número de perfilhos por planta variou de 2,06 a 3,28 para 75% e 100% da ET_m, respectivamente.

Mollah e Paul (2011) constataram influência do número de perfilhos por planta de cevada em função do status de água no solo. No experimento conduzido pelos referidos autores essa variável-resposta apresentou valores médios de 3,54; 3,26 e 2,82 para as lâminas de água de 40 mm, 20 mm e 0 mm, respectivamente.

Na avaliação de três genótipos de trigo submetidos a condição de irrigado e indução de déficit hídrico, D. dos Santos *et al.* (2012) não observaram efeito de interação entre regime hídrico e cultivar sobre número de perfilhos por planta. Para a condição de irrigado o número de perfilhos por planta foi superior em comparação a situação de indução de déficit hídrico. Os valores médios dessa variável oscilaram de 11,38 a 9,60 para irrigação durante todo o ciclo e indução de estresse hídrico antes do florescimento, respectivamente.

5.2.4 Número de espiga por planta (NEP), número de grãos por espiga (NGE), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP), e massa de mil grãos (MMG)

O NEP não foi afetado significativamente pelas proporções de Ca:Mg. Entretanto, essa variável-resposta foi condicionada pelo status de água no solo (Tabela 15). Como descrito na Figura 54, o NEP aumentou linearmente sob o efeito do suprimento de água no solo. O maior valor foi de 5,5 obtido com uma lâmina correspondente a 120% da ET_m e o menor valor foi de 3,5 obtido com uma lâmina correspondente a 80% da ET_m.

Com intuito de analisar a resposta biológica da cevada sob estratégias de irrigação plena e deficitária, Nagaz *et al.* (2008) conduziram um experimento a campo sob condições de clima árido do Mediterrâneo ao sul da Tunísia. Os referidos autores dividiram os tratamentos em quatro níveis de irrigação: irrigação plena com quantidade de água aplicada de 100% da ET_m e outros três tratamentos irrigados com a mesma frequência do tratamento 100% da ET_m, porém com quantidade igual a 50%,

70% e 85% da ETm acumulada. Os diferentes níveis de água no solo afetaram o número de espigas por metro quadrado de solo. Os valores médios estimados da variável-resposta foram de 219,33; 208,67; 201,00 e 189,33 sob 100, 85, 70 e 50% da ETm, respectivamente.

Tabela 15 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para número de espiga por planta (NEP), número de grãos por espiga (NGE), número de grãos por planta (NGP), massa de grãos por planta (MGP) e massa de mil grãos (MMG) em população de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		NEP	NGE	NGP
Água (W)	3	15,1873**	8,0573 ^{ns}	4929,2667**
Ca:Mg (R)	3	0,0680 ^{ns}	6,7670 ^{ns}	102,1667 ^{ns}
W x R	9	0,9710 ^{ns}	7,0786 ^{ns}	347,9222 ^{ns}
C.V. (%)		21,81	12,55	26,66
		MGP		MMG
Água (W)	3	15,477**		45,1233**
Ca:Mg (R)	3	0,3453 ^{ns}		6,4433 ^{ns}
W x R	9	0,9448 ^{ns}		7,4478 ^{ns}
C.V. (%)		28,96		5,88

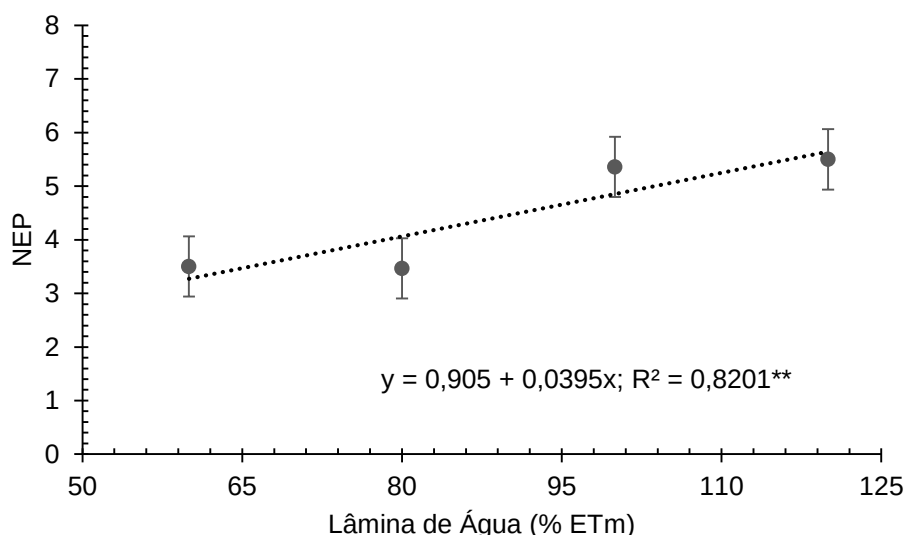
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 54 – Número de espigas por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Efeito do status de água no solo foi constatado por Jahromi, Razzaghi e Zand-Parsa (2023) sobre o número de espigas por metro quadrado de solo cultivado com

cevada em experimento de campo no Irã. Os valores médios estimados da referida variável-resposta foram de 515,62; 418,51; 289,71 e 126,54 sob os tratamentos de água I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente para a estação de crescimento de 2013-2014. Na safra agrícola de 2014-2015, os valores médios estimados de número de espigas por metro quadrado foram de 563,69; 490,24; 354,96 e 155,38 sob o efeito da aplicação das lâminas de água correspondentes aos tratamentos I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente.

O NGE não foi afetado em função dos níveis de água no solo e balanço catiônico (Tabela 15). O valor médio determinado foi de 15,2. Sanches *et al.* (2015) observaram aumento linear em função do suprimento de água no solo. O NGE apresentou uma variação de 18,90 a 31,85 sob lâminas de água referentes a 50% e 125% da ET_m, respectivamente para o cultivar BRS Sampa. No genótipo BRS Manduri, os valores máximo e mínimo do NGE foram 34,20 e 20,95 para 100% e 75% da ET_m, respectivamente. Para o cultivar BRS 195, os valores médios oscilaram de 19,30 a 33,05 para 50% e 100% da ET_m, respectivamente.

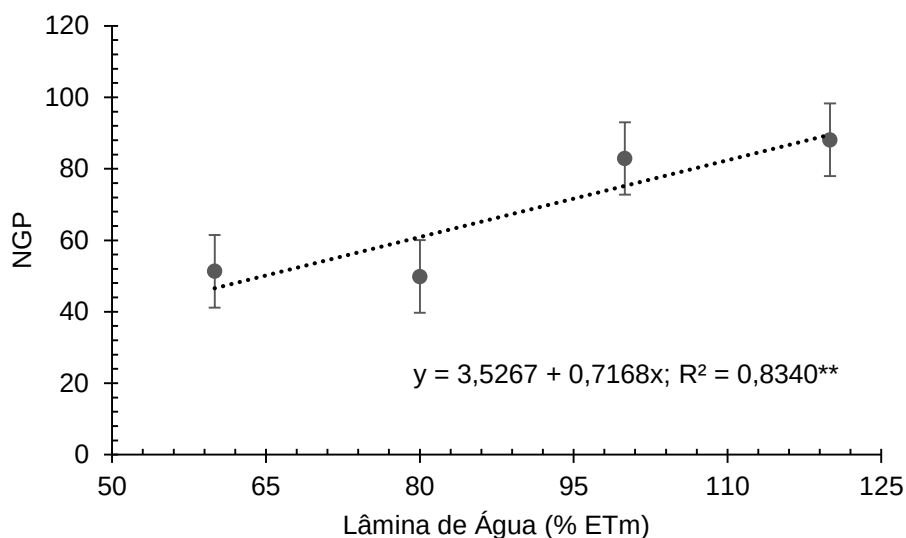
Avaliando a resposta fitotécnica da cevada sob condições de clima árido do Mediterrâneo ao sul da Tunísia, Nagaz *et al.* (2008) verificaram que o NGE foi afetado em função dos níveis de água no solo. Os valores médios estimados da variável-resposta em estudo foram de 47,93; 46,00; 42,13 e 40,33 sob 100, 85, 70 e 50% da ET_m, respectivamente.

Jahromi, Razzaghi e Zand-Parsa (2023) observaram que o NGE da cevada foi afetado pelas diferentes lâminas de água aplicada. Os valores médios do NGE obtidos foram de 31,26; 28,95; 27,11 e 18,20 sob a influência dos tratamentos I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente.

Para avaliação dos parâmetros fitotécnicos de trigo em condições de ambiente protegido, D. dos Santos *et al.* (2012) verificaram efeito de regimes hídricos sobre as respostas biológicas dos cultivares CD 105 e CD 111 da referida espécie vegetal. Os valores de NGE sofreram variação sob manejo irrigado e déficit hídrico induzido de 43,46 e 18,84 para o cultivar CD 105, bem como de 35,16 e 15,18 para o cultivar CD 111, respectivamente.

Da mesma forma do que foi observado no NEP, o NGP não foi influenciado significativamente pelo balanço catiônico (Tabela 15), porém essa variável aumentou linearmente em função do crescente suprimento hídrico do solo (Figura 55). Os valores de NGP oscilaram de 49,9 a 88,1 sob 80% e 120% da ET_m, respectivamente.

Figura 55 – Número de grãos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Na condução de um experimento com cevada em função de três lâminas de água, Mollah e Paul (2011) verificaram diferença de NGP. Os valores médios de NGP foram da ordem de 59,28; 52,69 e 46,03 sob a aplicação das lâminas de irrigação de 40 mm, 20 mm e 0 mm, respectivamente.

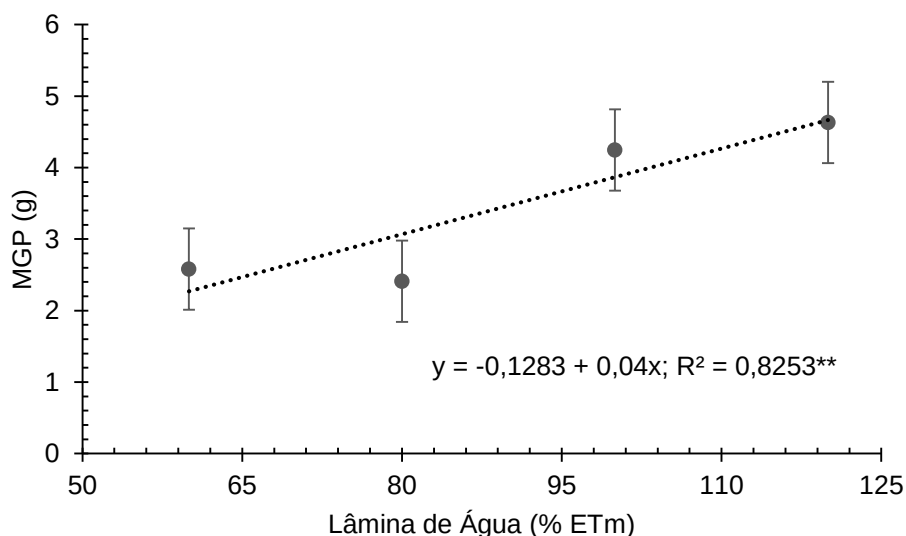
D. dos Santos *et al.* (2012) observaram efeito do suprimento hídrico do solo sobre o NGP em trigo cultivado em casa de vegetação. Os referidos autores não constataram efeito de interação entre cultivar e manejo de irrigação sobre a variável-resposta em questão, com valores oscilando de 629,80 sob situação adequada de água no solo e 376,53 sob condição de estresse hídrico.

A MGP de cevada não foi afetada pelo balanço de cátions (Tabela 15) e apresentou aumento linear em função do crescente suprimento de água no solo (Figura 56). Efeito de interação entre o suprimento hídrico do solo e a relação Ca:Mg no solo não foi observado sobre a MGP para a cultura de cevada. Os valores máximo e mínimo de MGP foram de 4,63 g e 2,41 g sob a influência dos tratamentos 120% e 80% da ETm, respectivamente.

A produtividade obtida por Sanches *et al.* (2015) foi descrita por um modelo de regressão quadrático em função do status de água no solo para os cultivares de cevada BRS Sampa, BRS Manduri e BRS 195. Os valores máximos atingidos pelos três cultivares foram de 6,17; 6,62 e 5,88 Mg ha⁻¹ para BRS Sampa, BRS Manduri e

BRS 195, respectivamente, com uma lâmina de irrigação corresponde a 100% da ETm. Com relação aos menores valores, estes foram obtidos com uma lâmina de irrigação corresponde a 50% da ETm, com produtividades médias de 1,33; 1,69 e 2,45 Mg ha⁻¹ para os genótipos BRS Sampa, BRS Manduri e BRS 195, respectivamente.

Figura 56 – Massa de grãos por planta de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

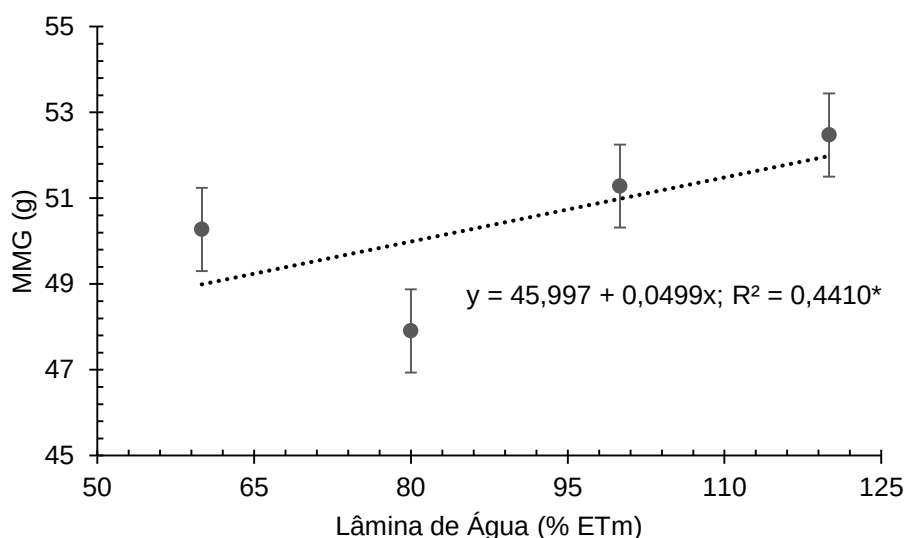
O rendimento de grãos de cevada determinado por Mollah e Paul (2011) foi afetado mediante aplicação de três diferentes lâminas de água. O rendimento foi de 2,078; 1,856 e 1,665 Mg ha⁻¹ sob lâminas de 40 mm, 20 mm e 0 mm, respectivamente. Jahromi, Razzaghi e Zand-Parsa (2023) verificaram que a produtividade da cevada foi afetada pelo status de água no solo. As produtividades médias obtidas pelos autores foram de 4,82; 4,42; 2,65 e 0,50 Mg ha⁻¹ sob regimes hídricos de I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente durante a safra agrícola de 2013-2014. Para a safra 2014-2015, as produtividades médias foram de 5,06; 4,98; 2,87 e 0,55 Mg ha⁻¹ sob aplicação dos tratamentos I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente.

D. dos Santos *et al.* (2012) detectaram redução na MGP de cevada com a indução do déficit hídrico no início do florescimento. Os valores médios da MGP foram de 5,5 g sob suprimento adequado de água no solo e 2,2 g em plantas submetidas ao estresse hídrico.

A MMG de cevada não foi condicionada pelo balanço catiônico no solo, entretanto foi afetada consideravelmente pelos níveis de água no solo (Tabela 15).

Efeito de interação entre esses fatores não foi constatado. Essa variável-resposta foi descrita por um modelo de regressão de primeiro grau, de forma que os valores máximo e mínimo foram de 52,5 g e 47,9 g para as lâminas referentes a 120% e 80% da ETm, respectivamente (Figura 57).

Figura 57 – Massa de mil grãos de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



Fonte: O autor

Avaliando o efeito de status de água no solo sobre a MMG de três cultivares de cevada, Sanches *et al.* (2015) observaram efeito quadrático entre as variáveis preditoras e as variáveis-respostas para os genótipos estudados. O cultivar BRS apresentou valor máximo e mínimo de 43,45 g e 37,88 g sob 100% e 50% da ETm, respectivamente. Para o cultivar BRS Manduri, os valores médios de MMG variaram de 39,23 g a 43,98 g sob lâminas de irrigação correspondentes a 50% e 125% da ETm, respectivamente. Com relação a variedade BRS 195, os valores médios de MMG oscilaram de 38,30 g a 43,20 g sob 50% e 100% da ETm, respectivamente.

Nagaz *et al.* (2008) identificaram impacto dos tratamentos de irrigação sobre a MMG da cevada cultivada em condições a campo na Tunísia. Os valores médios aferidos no presente estudo foram 48,0 g; 46,67 g; 44,4 g e 43,17 g sob lâminas de água de 100%, 85%, 70% e 50% da ETm, respectivamente. Para a cevada cultivada sob as condições climáticas reinantes no Irã, Jahromi, Razzaghi e Zand-Parsa (2023) constataram que a MMG foi influenciada pelo suprimento hídrico do solo. Os valores

médios da MMG obtida pelos referidos autores foram de 46,57 g; 44,48 g; 42,40 g e 37,80 g para os tratamentos I_{100%}, I_{75%}, I_{50%} e I_{0%}, respectivamente.

Por ocasião da análise do efeito do déficit hídrico sobre três variedades de trigo sob condições de ambiente protegido, D. dos Santos *et al.* (2012) verificaram influência do suprimento de água no solo sobre a MMG do referido cereal de inverno. Entretanto, não foi observado efeito de interação entre regimes hídricos e genótipos, com valores de 35,26 g para plantas submetidas a irrigação durante todo o ciclo e 24,29 g em plantas que tiveram a irrigação suspensa no início do florescimento.

A relação Ca:Mg no solo não afetou o rendimento de massa seca de trigo conduzido em ambiente protegido, segundo Luciano Junior (2018). Os valores médios obtidos pelo referido autor para rendimento de massa seca foram de 3,42 g vaso⁻¹ em plantas conduzidas em um Latossolo Bruno Distroférrico típico e 5,0 g vaso⁻¹ para espécies semeadas em Latossolo Bruno Aluminoférrico típico. Tais resultados evidenciam que a relação Ca:Mg do calcário não condiciona a expressão do rendimento biológico econômico da cultura.

5.2.5 Atributos químicos do solo

Os teores de Ca trocável foram afetados significativamente pelos níveis de água no solo e pelas relações Ca:Mg; entretanto, não foi observado efeito de interação entre esses dois fatores (Tabela 16). Essa variável-resposta foi reduzida linearmente com o aumento do suprimento hídrico do solo, com valores oscilando entre 4,30 cmol_c dm⁻³ sob nível de umidade de 120% da ET_m e 5,15 cmol_c dm⁻³ sob nível de umidade de 60% da ET_m (Figura 58). A maior disponibilidade de água no solo está relacionada com menor concentração de Ca trocável no solo, de forma que a absorção do nutriente é facilitada pelo maior suprimento hídrico do solo. A absorção de Ca²⁺ pelas raízes das plantas de cevada foi governada pelo status de água no solo, demonstrando que os teores mais baixos do nutriente estão condicionados pela maior absorção de Ca pelas plantas, uma vez que o referido cátion chega às raízes predominantemente por fluxo de massa (Raij, 2011).

Tabela 16 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para teores de Ca, Mg e K no solo após o final do ciclo da cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Ca trocável	Mg trocável	K trocável
Água (W)	3	2,0860**	0,1834 ^{ns}	0,03217**
Ca:Mg (R)	3	6,0930**	5,6927**	0,00044 ^{ns}
W x R	9	0,1070 ^{ns}	0,0940 ^{ns}	0,00067 ^{ns}
C.V. (%)		10,30	27,00	12,67

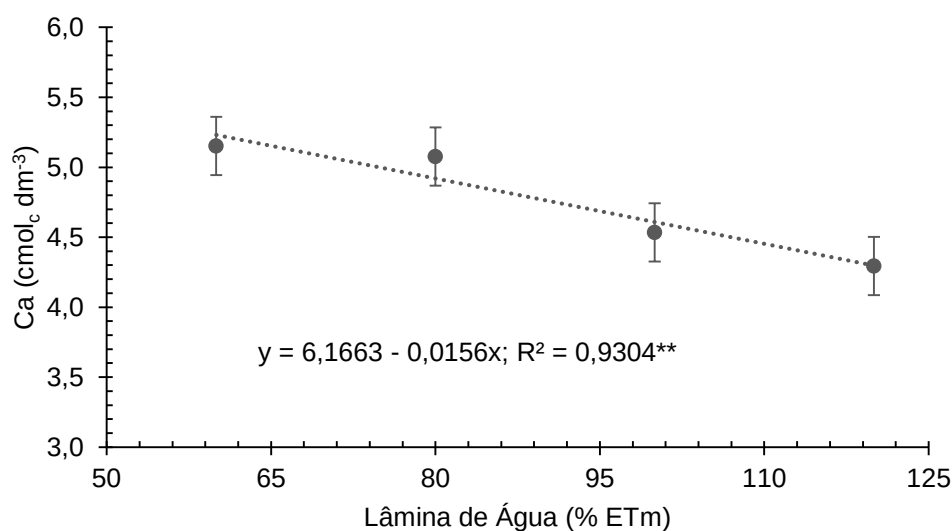
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

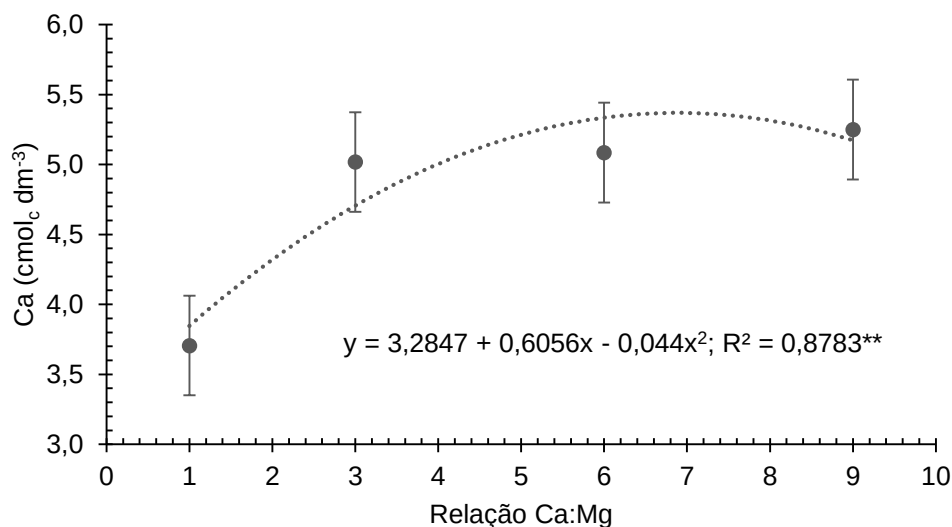
Figura 58 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com relação ao fator balanço de cátions no solo, o teor de Ca trocável foi descrito por um modelo de regressão quadrático, com valores máximo e mínimo de 5,25 e 3,71 cmol_c dm⁻³ sob as proporções Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente (Figura 59). Da mesma forma ao que foi constatado no cultivo da soja, esse resultado está relacionado com o incremento do Ca no solo devido à maior quantidade de CaCO₃ aplicada em detrimento da menor quantidade de MgCO₃ incorporada com o aumento da relação Ca:Mg.

Figura 59 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo de cevada em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

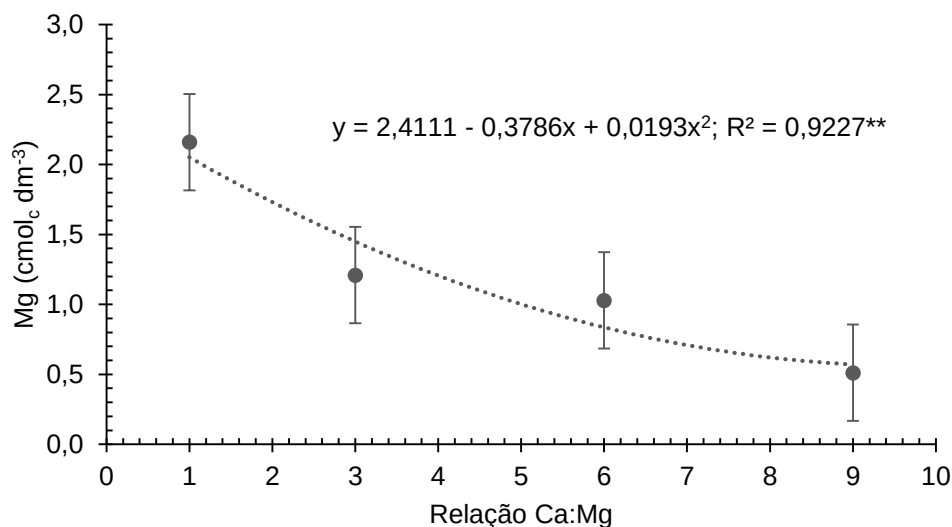


Fonte: O autor

Um aumento linear dos teores de Ca trocável no solo foi observado por Luciano Junior (2018) sob as relações Ca:Mg do solo de 0,5:1; 1:1; 2:1; 4:1 e 8:1 após o cultivo de trigo em ambiente protegido. Seus valores médios de Ca trocável obtidos no presente estudo apresentaram uma variação de 6,4 a 10,5 cmol_c dm⁻³ sob as proporções de Ca:Mg de 0,5:1 e 8:1, respectivamente. Após o cultivo de soja seguida de aveia preta num sistema de sucessão, Holzschuh (2007) encontrou aumento nos teores de Ca trocável no solo após aplicação de cinco tratamentos de calagem determinados a partir de diferentes proporções de calcário calcítico e dolomítico. O solo cultivado sob os tratamentos 25% calcário calcítico + 75% calcário dolomítico e 100% calcário dolomítico proporcionaram menores teores de Ca trocável no solo em comparação ao demais tratamentos.

Os teores de Mg trocável no solo não foram influenciados pelo suprimento hídrico do solo. Contudo, esse nutriente foi afetado significativamente pelo balanço de cátions do solo (Tabela 16). Um modelo de regressão quadrático descreveu os teores de Mg trocável sob as proporções Ca:Mg do solo, com valores oscilando de 0,51 a 2,16 cmol_c dm⁻³ sob as relações Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente (Figura 60). Da mesma forma ao que foi evidenciado para o teor de Ca trocável, a redução na concentração de Mg no solo pode ser o resultado do acréscimo da quantidade de CaCO₃ em detrimento do MgCO₃ no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

Figura 60 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo de cevada em função das relações Ca:Mg no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

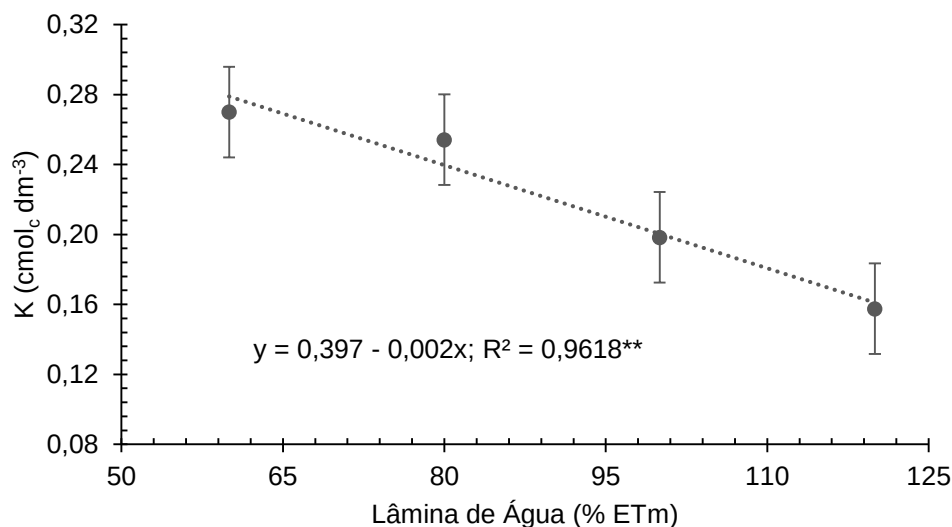


Fonte: O autor

Luciano Junior (2018) observou que os teores médios de Mg trocável do solo diminuíram linearmente em função do balanço de cátions após o cultivo de trigo em ambiente protegido. O Mg trocável foi reduzido de 5,4 para 1,7 cmol_c dm⁻³ com o aumento da relação Ca:Mg de 0,5:1 para 8:1. Holzschuh (2007) detectou aumento nos teores de Mg trocável no solo após cultivo de soja seguida de aveia preta mediante calagem num sistema de sucessão de culturas. Os maiores teores de Mg trocável foram encontrados nas amostras de solo coletadas em áreas submetidas aos tratamentos com 25% de calcário calcítico + 75% de calcário dolomítico e 100% de calcário dolomítico.

Para os teores de K trocável no solo, o suprimento de água no solo afetou significativamente a concentração do referido nutriente após o cultivo da cevada (Tabela 16). Entretanto, não se constatou efeito do balanço de cátions sobre os teores de K trocável no solo. Os teores de K trocável máximo e mínimo foram de 0,27 e 0,16 cmol_c dm⁻³ sob 60 % da ETm e 120% da ETm, respectivamente (Figura 61). Os menores teores de K trocável no solo sob os maiores níveis de água no solo podem estar relacionados com a maior disponibilidade de água no solo, a qual favorece a difusão do elemento na solução do solo e de seu transporte para a rizosfera.

Figura 61 – Teores de K trocável no solo após o cultivo de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

5.2.6 Atributos químicos da parte aérea

A extração de Ca pelas plantas de cevada não foi governada pela relação Ca:Mg no solo; porém, foi influenciada significativamente pelo suprimento de água no solo (Tabela 17). Um modelo de regressão linear descreveu a extração de Ca pelas plantas em função do suprimento de água no solo, com valores extremos de 0,21 g planta⁻¹ sob 120% da ETm e 0,10 g planta⁻¹ sob 60% da ETm (Figura 62).

Tabela 17 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de cevada sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Extração de Ca	Extração de Mg	Extração de K
Água (W)	3	0,03120**	0,00767**	1,94513**
Ca:Mg (R)	3	0,00104 ^{ns}	0,00218*	0,01640 ^{ns}
W x R	9	0,00225 ^{ns}	0,00158*	0,06154 ^{ns}
C.V. (%)		29,98	30,99	16,81

^{ns} - não significativo.

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

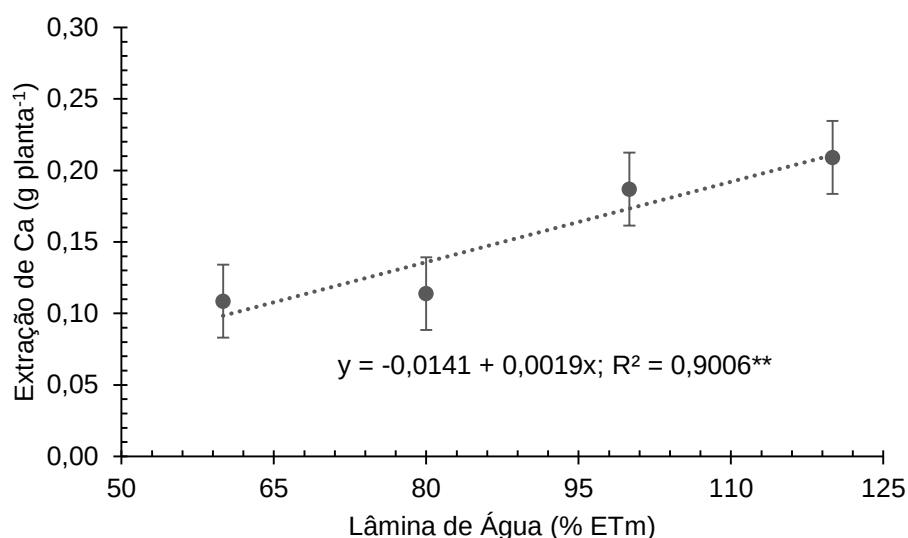
C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Holzschuh (2007), estudando a influência de diferentes relações Ca:Mg no solo no desempenho agrônômico de aveia preta mediante a prática da calagem com calcário calcítico e dolomítico sob diferentes proporções, não detectou nenhuma diferença na concentração de Ca da parte aérea das plantas. O experimento foi

conduzido nos municípios de Santa Maria, Santo Ângelo, Cruz Alta e São Gabriel, RS, sob adoção de calagem efetuada de forma superficial, bem como perante incorporação de calcário no perfil do solo.

Figura 62 – Extração de Ca pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

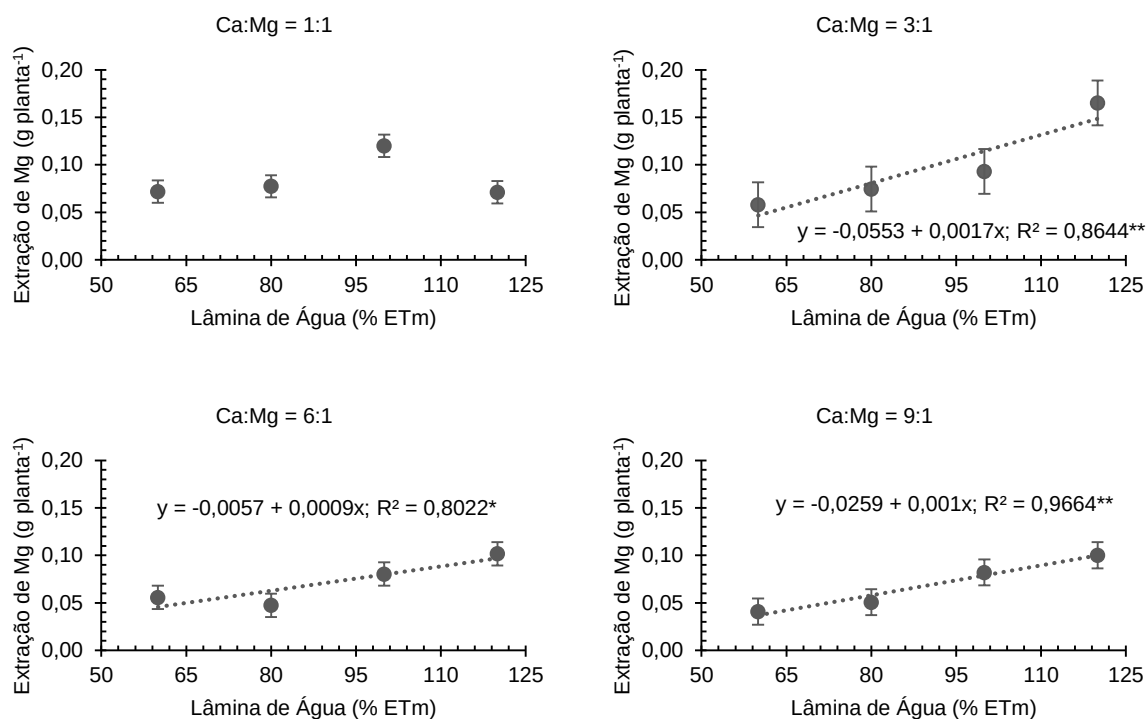


Fonte: O autor

A extração de Mg pelas plantas de cevada foi influenciada pelo suprimento de água, pela relação Ca:Mg e pela interação entre os tratamentos. (Figura 63). Na relação Ca:Mg no solo 1:1, a absorção de Mg pelas plantas não foi governada pelo status de água no solo. Nas relações Ca:Mg no solo 3:1, 6:1 e 9:1, a extração de Mg pelas plantas de cevada aumentou linearmente com o incremento do suprimento de água no solo.

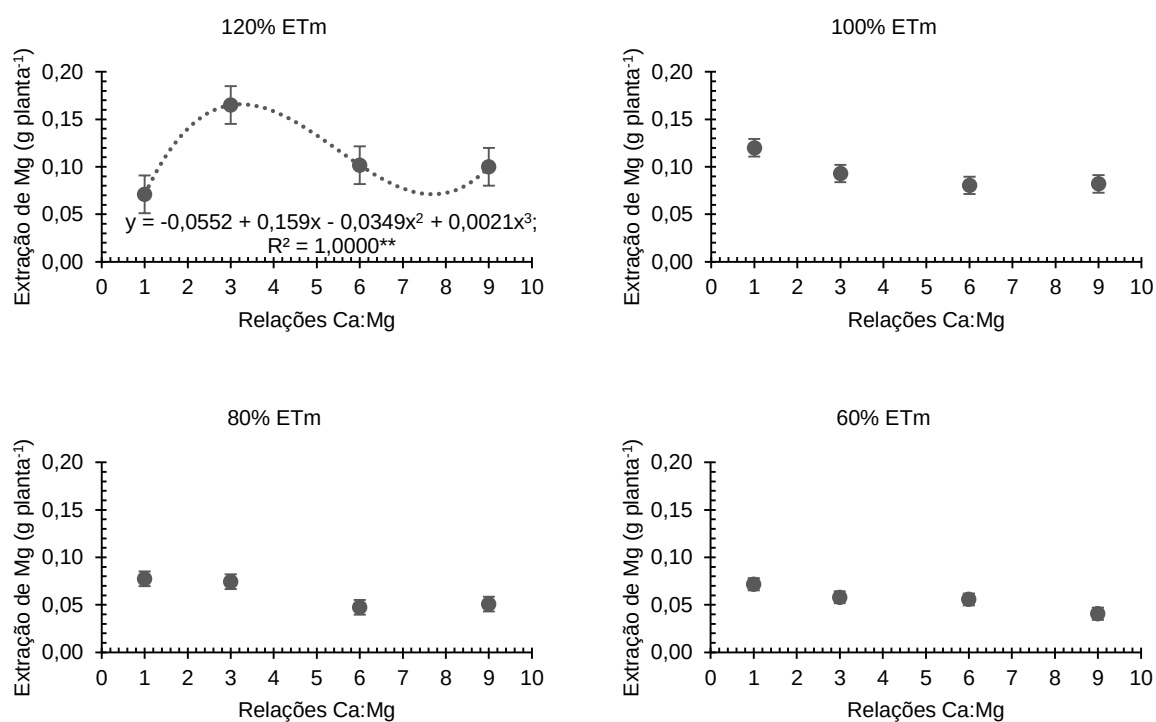
A extração de Mg pelas plantas de cevada sob o nível de água no solo de 120% da ETm foi descrita por modelo de regressão cúbico, sem qualquer significado agrônomo (Figura 64). Para os níveis de 100%, 80% e 60% da ETm, a extração de Mg não foi significativamente influenciada pela relação Ca:Mg no solo.

Figura 63 – Extração de Mg pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 64 – Extração de Mg pelas plantas de cevada em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

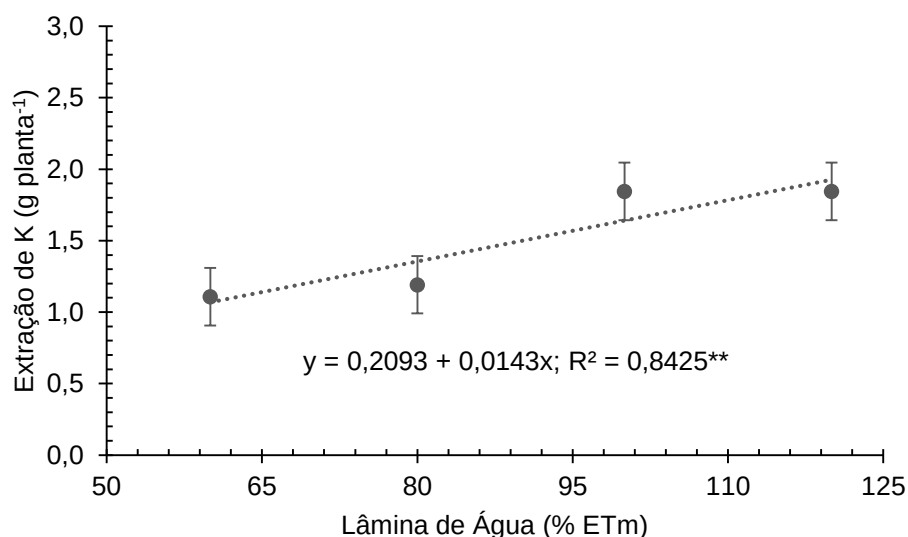


Fonte: O autor

A concentração de Mg na parte aérea de plantas de aveia-preta em um experimento de campo conduzido por Holzschuh (2007) não foi significativamente afetada pelas relações Ca:Mg do solo. Esse resultado foi evidenciado mesmo quando a aplicação de calcário calcítico e dolomítico foi adotada considerando-se diferentes proporções, tanto na forma superficial e como também incorporada no perfil do solo.

A absorção de K pelas plantas de cevada não foi significativamente condicionada pelas relações Ca:Mg no solo (Tabela 17). No entanto, essa variável-resposta aumentou linearmente com o incremento do suprimento hídrico no solo (Figura 65). O valor máximo da extração de K pelas plantas foi de 1,92 g planta⁻¹ sob 120% da ETm e o valor mínimo da extração de K pelas plantas foi de 1,07 g planta⁻¹ sob 60% da ETm.

Figura 65 – Extração de K pelas plantas de cevada em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

5.3 CULTURA DO MILHO

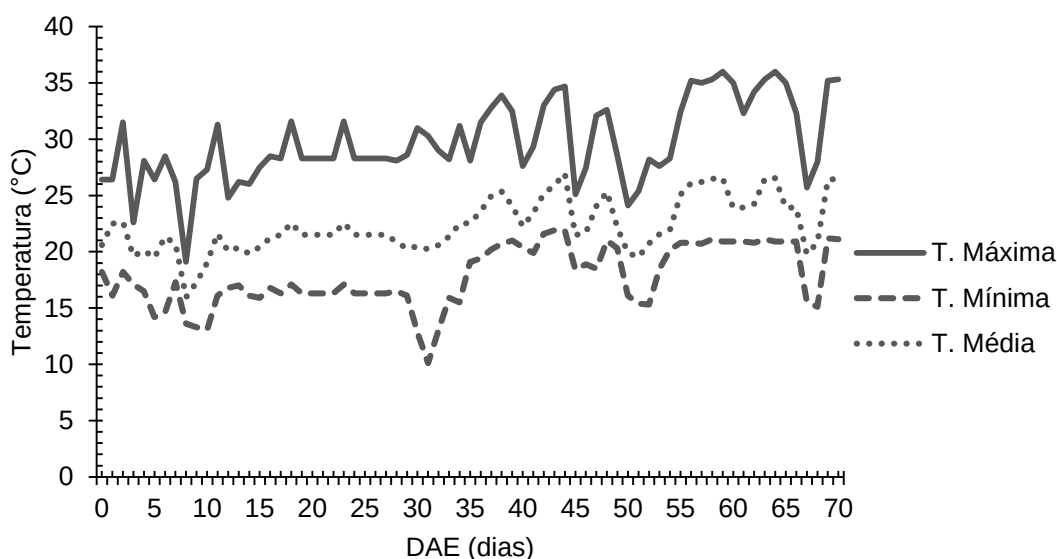
5.3.1 Condições climáticas

Os dados referentes às temperaturas e umidades relativas máxima, mínima e média no interior da casa de vegetação foram obtidos durante toda a época de condução da cultura do milho em ambiente protegido. Na Figura 66 são apresentadas as temperaturas máxima, mínima e média no interior da casa de vegetação. Pode-se constatar que a temperatura média do ar durante a estação de crescimento foi em

torno de 22,3°C. Entretanto, a temperatura máxima chegou a atingir valores superiores a 35°C no final da estação de crescimento, principalmente na época em que as plantas iniciaram a fase de florescimento. Como o milho é uma planta de metabolismo C₄, a sua fotossíntese é menos afetada em temperaturas elevadas do que em espécies de metabolismo C₃ (Bergamaschi; Matzenauer, 2009), apresentando fotorrespiração extremamente baixa que é favorecida em condições de altas temperaturas em plantas com metabolismo C₃ (Kerbaudy, 2004).

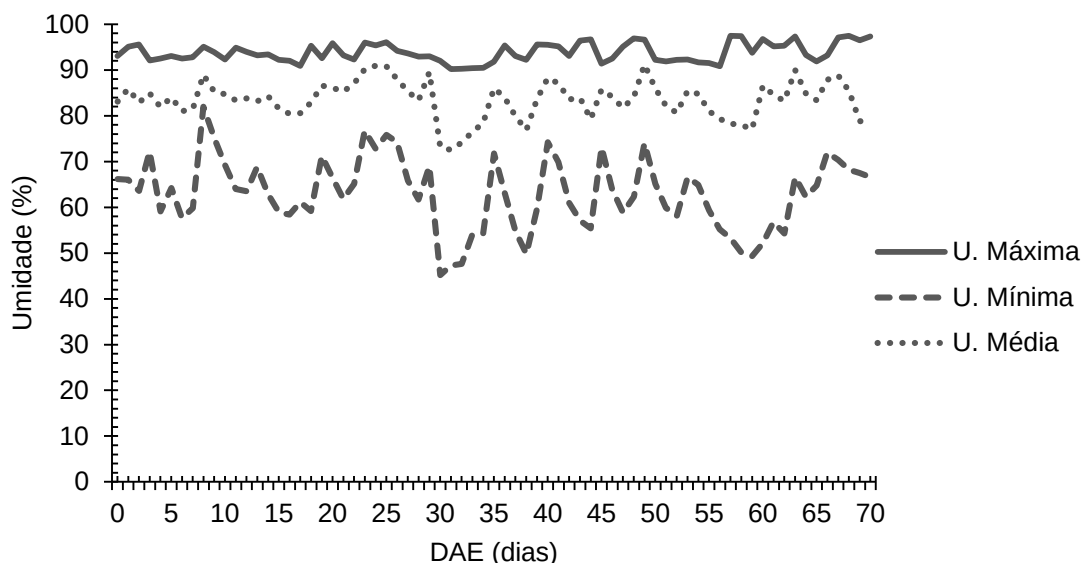
A Figura 67 ilustra os valores de umidade relativa máxima, mínima e média no interior da casa de vegetação. Observa-se que a umidade relativa média durante a estação de crescimento foi de 83,3%. Durante grande parte do período de condução da cultura do milho, os valores mínimos de umidade relativa foram inferiores a 65% e os valores máximos foram superiores a 90% durante toda estação de crescimento da espécie. Esses valores de umidade relativa podem afetar as taxas de transpiração e a fotossíntese das plantas de milho cultivadas sob condições de ambiente protegido. Uma maior umidade relativa do ar está relacionada a uma menor taxa de transpiração foliar, reduzindo a taxa de assimilação de CO₂, limitando dessa forma o rendimento fitotécnico da cultura.

Figura 66 – Regime de temperatura do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento do milho. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.



Fonte: O autor

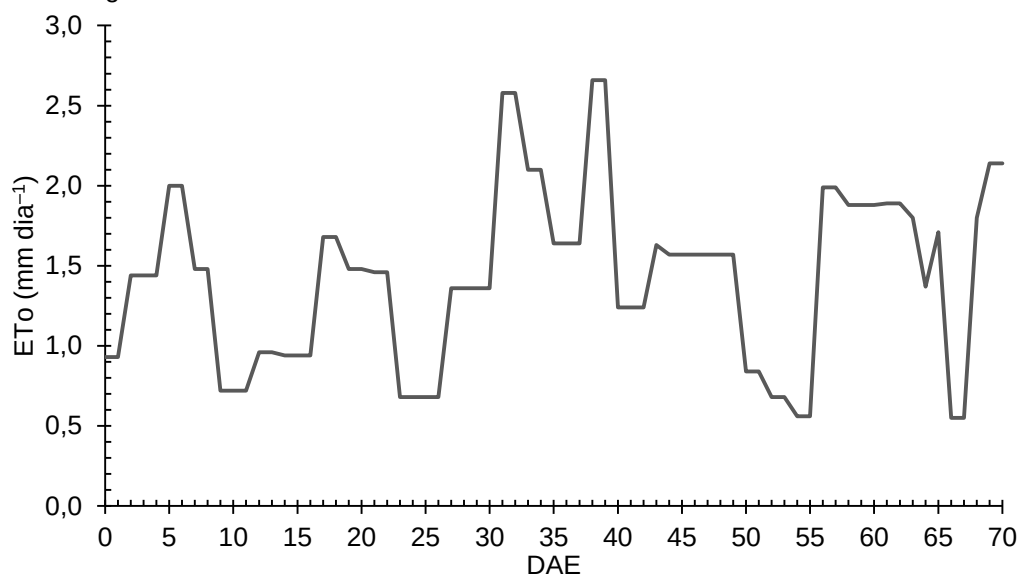
Figura 67 – Regime de umidade relativa do ar: a) máxima; b) mínima; c) média (°C) no interior da casa de vegetação durante a estação de crescimento do milho. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.



Fonte: O autor

Na Figura 68, estão ilustrados os dados de ETo ao longo da estação de crescimento das plantas de milho cultivadas sob condições de ambiente protegido no ano de 2023 em Ponta Grossa, PR. A ETo total do período foi de 101,43 mm durante o experimento 3 conduzido com a cultura do milho.

Figura 68 – Valores médios diário das taxas de evapotranspiração de referência (ETo) obtidas pelo método do Tanque Classe A ao longo da estação de crescimento de plantas de milho cultivadas em ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. DAE: dias após a emergência.



Fonte: O autor

As variáveis climáticas no interior de ambientes protegidos diferem em relação aquelas observadas em ambiente externo devido a interferência da cobertura plástica (Braga; Klar, 2000). A cobertura plástica altera de forma significativa o balanço de radiação em seu interior, devido a diminuição da densidade de fluxo de radiação solar global pela cobertura, reduzindo o saldo de radiação interno e, conseqüentemente, as taxas de evapotranspiração máxima das culturas agrícolas (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002). Porém, vale destacar aqui que as condições climáticas locais reinantes em ambiente externo exercem influência marcante sobre o regime vigente dos elementos meteorológicos a serem monitorados em ambiente protegido. A carga térmica que incide sobre as estruturas de uma casa de vegetação instalada em dada localidade climática, certamente, condiciona a demanda evaporativa do ambiente de cultivo e, conseqüentemente, determina o desempenho fitotécnico e ecofisiológico de espécies vegetais cultivadas de importância agro-econômica local.

5.3.2 Água aplicada, consumo hídrico e coeficiente de cultivo

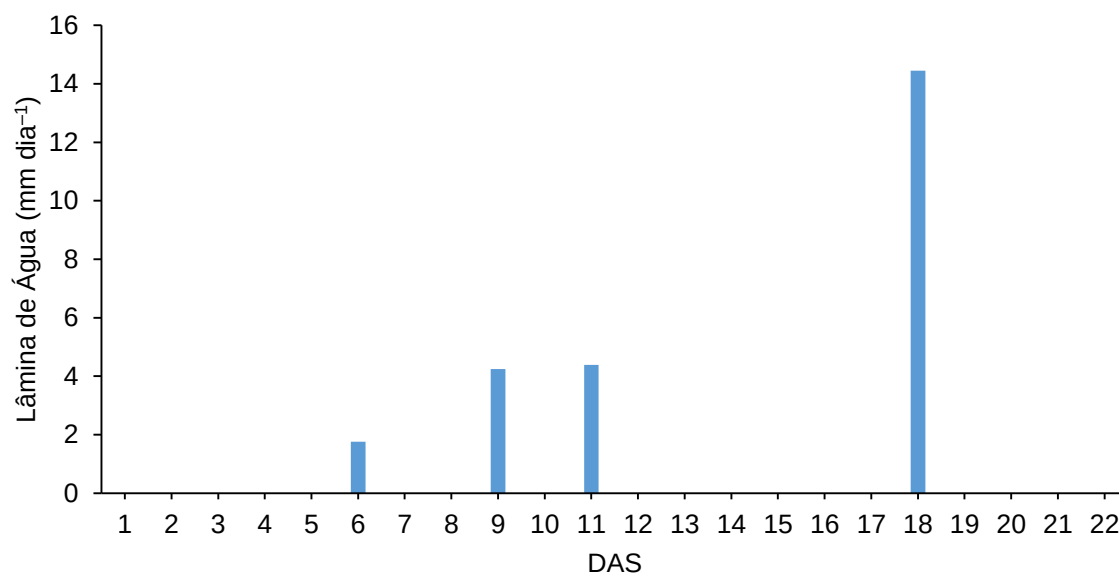
A lâmina de água média irrigada nos vasos antes da aplicação dos tratamentos de água no solo está ilustrada na Figura 69. Os vasos foram irrigados de forma que todos apresentasse conteúdo de água no solo na ou próximo da capacidade de vaso inicialmente, com a lâmina média total correspondente a 29,0 mm. Após aplicação dos tratamentos de água nos seus diferentes níveis de suprimento hídrico, cada vaso recebeu frações específicas da lâmina ideal de água de acordo com os tratamentos estipulados para o experimento 3.

A Figura 70 mostra as distintas lâminas de água determinadas após a aplicação dos tratamentos referentes aos níveis de suprimento hídrico do solo. Os vasos com as plantas de milho foram irrigados com as seguintes lâminas de água: 409,8; 341,5; 273,2 e 204,9 mm, respectivamente, para 120, 100, 80 e 60% da ET_m. A lâmina de água aplicada em cada vaso foi diferente entre os tratamentos, definidas em função das diferentes frações de ET_m obtida por meio da pesagem dos vasos. Todas as irrigações realizadas neste subperíodo ocorreram no mesmo dia para todos os tratamentos referentes aos níveis de água no solo.

Na Figura 71 é descrito o consumo hídrico médio das plantas de milho antes da aplicação dos tratamentos de água no solo. Nos primeiros dias após a emergência o consumo hídrico apresentou um aumento devido as maiores temperaturas atingidas

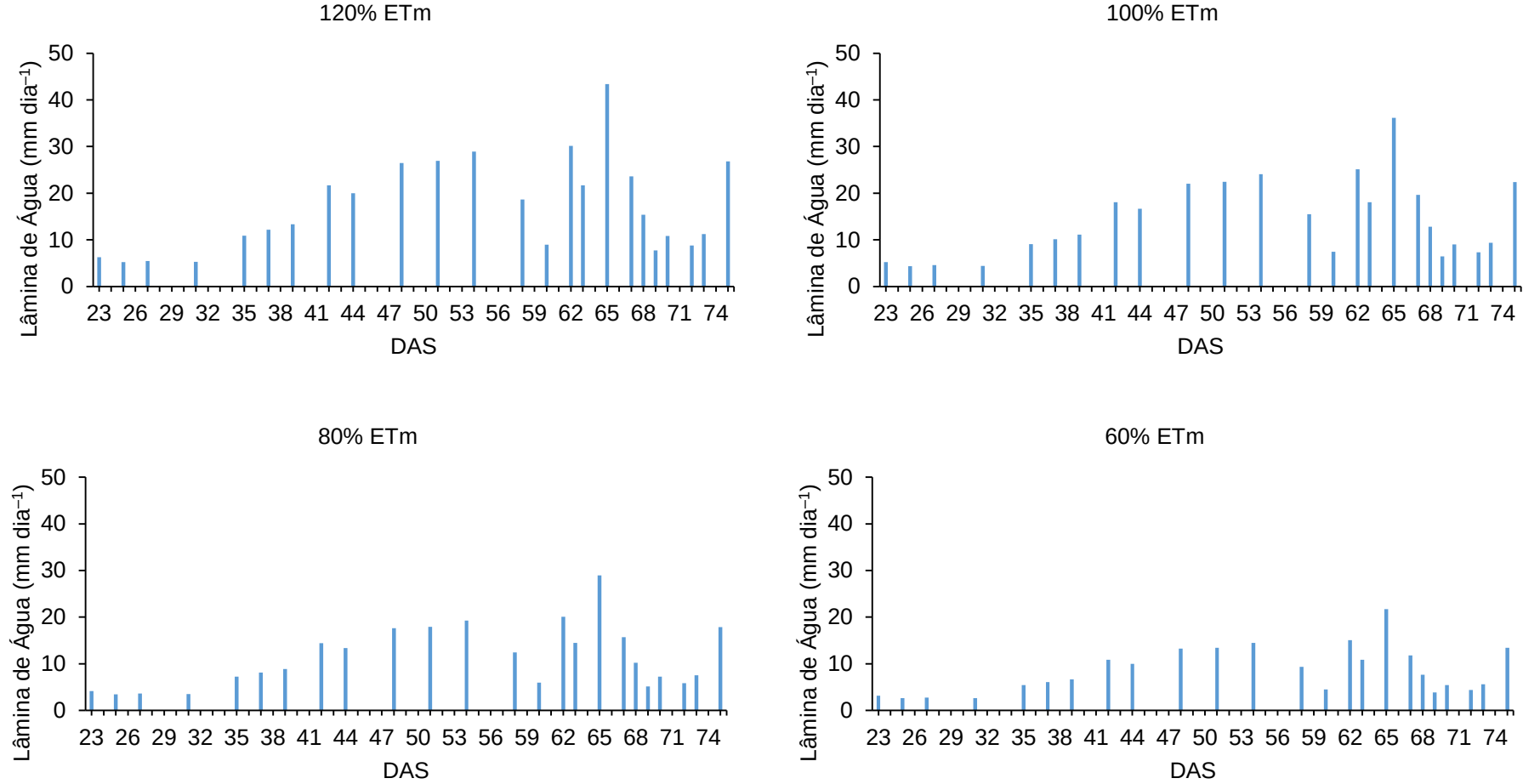
neste subperíodo de desenvolvimento das plantas de milho. O consumo hídrico foi maior aos 17 DAE com valor de 2,6 mm. Essa maior perda de água é resultado das altas temperatura do ar registradas nesse dia. O consumo hídrico acumulado nesse subperíodo foi de 25,7 mm.

Figura 69 – Valores diários da lâmina ideal de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de milho cultivadas sob condição de ambiente protegido em função da idade fisiológica das plantas. Ponta Grossa – PR, 2024. DAS: dias após a semeadura.



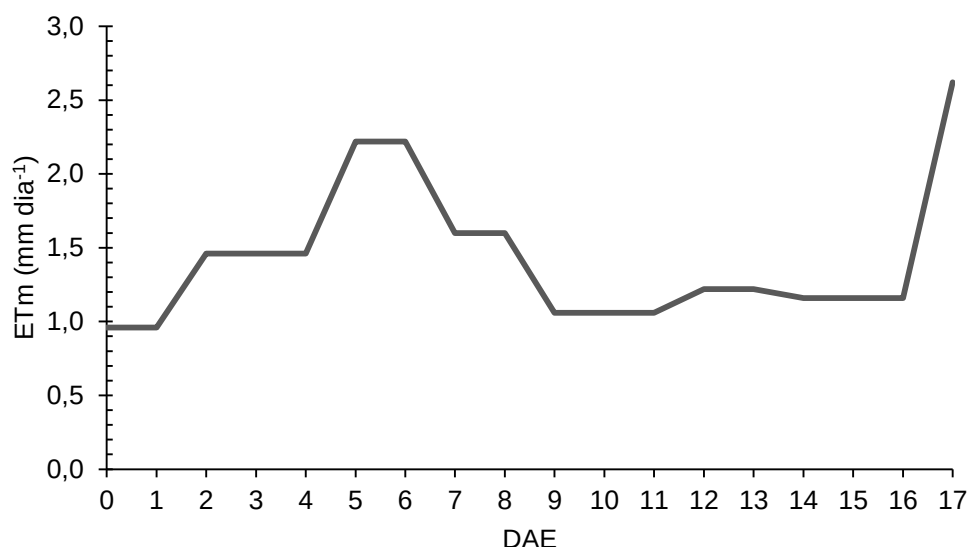
Fonte: O autor

Figura 70 – Lâminas totais de irrigação aplicadas durante a estação de crescimento da cultura de milho em função de dias após a semeadura - DAS. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Figura 71 – Consumo hídrico médio diário no subperíodo de estabelecimento da cultura do milho sob condições de ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



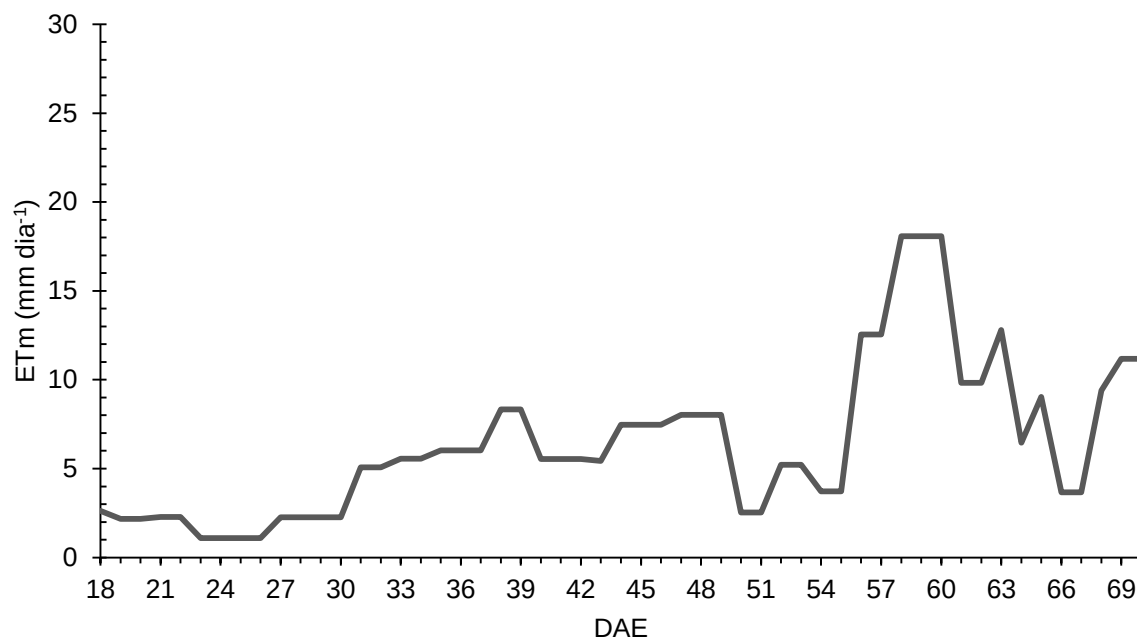
Fonte: O autor

Na Figura 72 está demonstrado o consumo hídrico médio das plantas de milho após a aplicação dos tratamentos de água. O consumo hídrico do milho foi verificado sob condições adequadas de água no solo. No subperíodo correspondente a 55 DAE observa-se um aumento no consumo hídrico devido as altas temperaturas registradas neste dia e a elevada área foliar. O valor médio diário foi de 6,4 mm com valor acumulado de 338,9 mm. A produtividade do milho é reduzida sob estresse hídrico (Chilundo *et al.*, 2017), principalmente no período entre florescimento e polinização, indicando distúrbios fisiológicos nas plantas (Anjos *et al.*, 2022).

O Kc durante o início do desenvolvimento da cultura do milho apresentou pouca variação (Figura 73). No final desta fase os valores foram ligeiramente mais elevados, devido ao aumento relativo do índice de área foliar. Os valores durante esta fase demonstraram uma oscilação entre 0,17 e 0,27.

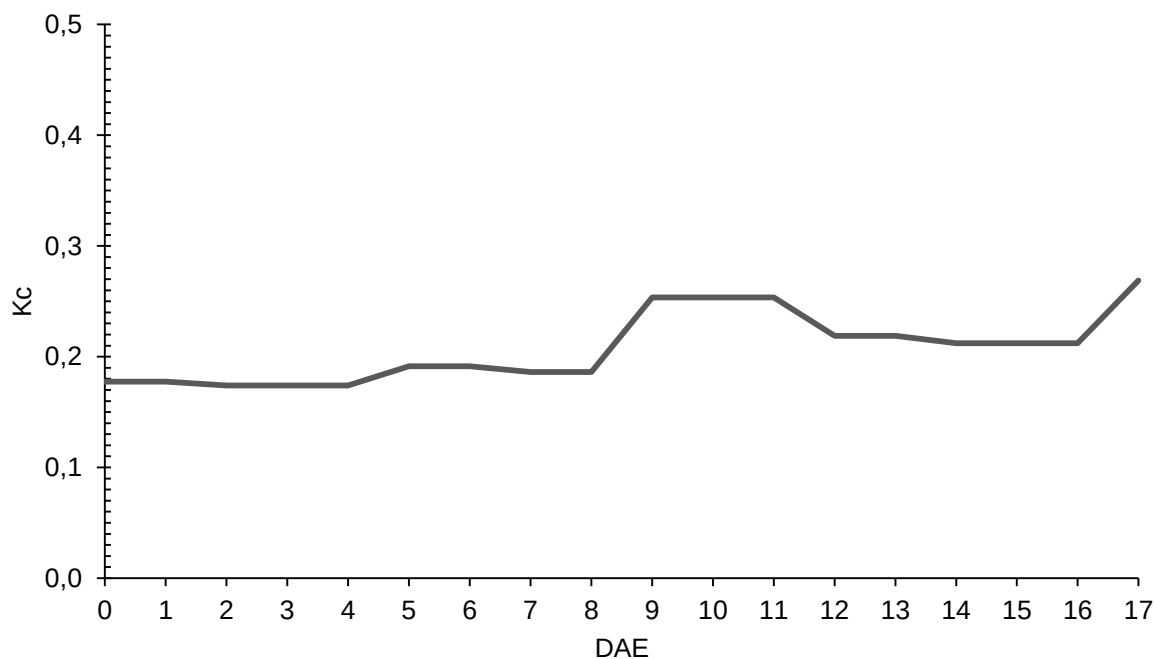
Os valores diários de Kc obtidos após aplicação dos tratamentos de água estão demonstrados na Figura 74. Um aumento foi observado durante o ciclo de cultivo, com os maiores valores de Kc no final da condução do experimento, época do início da fase de pendoamento, culminando com maior demanda hídrica das plantas. O Kc do milho durante a fase de formação da produção atingiu valor máximo da ordem de 1,66.

Figura 72 – Consumo hídrico ideal diário (ETm) da cultura do milho desde o desenvolvimento vegetativo até início do período reprodutivo das plantas em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



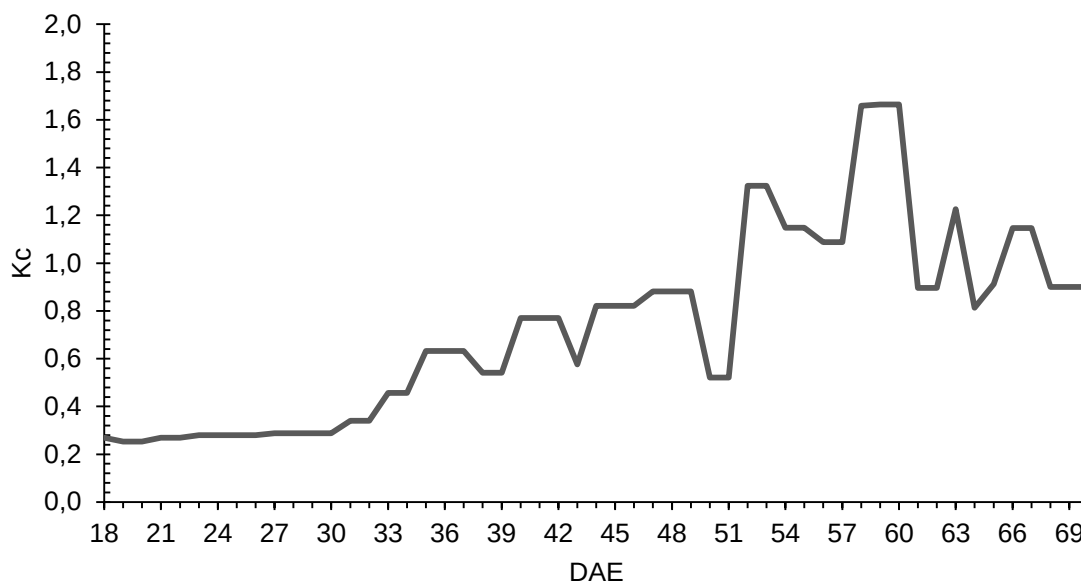
Fonte: O autor

Figura 73 – Variação do consumo hídrico relativo (Kc) entre a semeadura, a germinação e a emergência do milho cultivado em ambiente protegido em decorrência de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

Figura 74 – Variação do consumo hídrico relativo (Kc) no decorrer dos subperíodos de desenvolvimento vegetativo do milho cultivado em ambiente protegido em função de dias após a emergência - DAE. Ponta Grossa – PR, 2024.



Fonte: O autor

5.3.3 Altura de plantas e diâmetro de colmo

Na Tabela 18 são apresentados altura de plantas e diâmetro de colmo. A altura de plantas não foi influenciada significativamente pelo balanço catiônico. Entretanto, constatou-se efeito dos níveis de água no solo sobre essa variável biométrica. Níveis de suprimento hídrico e relação Ca:Mg não sofreram efeito de interação entre si. A altura de plantas foi descrita por um modelo de regressão quadrático em função do status de água no solo (Figura 75). Seus valores máximo e mínimo foram de 215,3 cm e 178,7 cm para lâminas de água correspondentes a 100% e 60% da ETm, respectivamente.

Tabela 18 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para altura de plantas e diâmetro de colmo em plantas de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios	
		Altura de Plantas	Diâmetro de Colmo
Água (W)	3	2978,7667**	0,6427 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	344,7667 ^{ns}	0,4753 ^{ns}
W x R	9	233,1556 ^{ns}	1,1243 ^{ns}
C.V. (%)		8,57	5,22

^{ns} - não significativo.

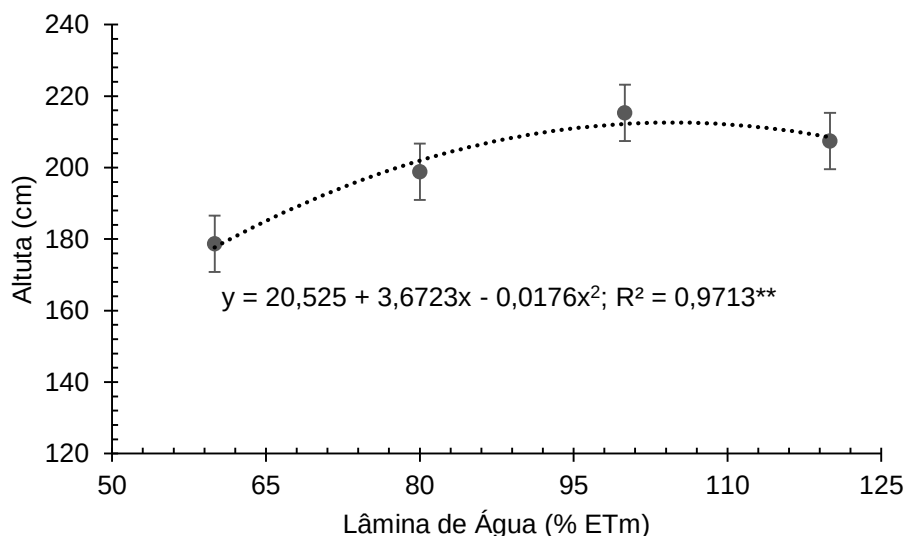
*,** - significativo a 5% e 1%, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Essa sensibilidade da altura de plantas em função do suprimento hídrico está relacionada com o momento da submissão das plantas aos tratamentos de água (Pias *et al.*, 2017). O déficit hídrico foi aplicado quando as plantas se encontravam no estágio V2, fase em que a cultura apresenta significativos incrementos na sua altura.

Figura 75 – Altura de plantas de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com a finalidade de avaliar o desempenho fitotécnico de milho em ambiente protegido, Pias *et al.* (2017) conduziram um experimento em ambiente protegido com três fatores. Os fatores foram constituídos por três híbridos de milho (P30F53, AS1551 e AG5011), quatro níveis de adubação (0; 0,5; 1 e 1,5 vezes da dose recomendada) e três manejos de água (sem déficit, déficit no pendoamento – VT e déficit no enchimento de grãos – R2). Os referidos autores constataram que as plantas foram afetadas pelo déficit hídrico aplicado durante a fase de pendoamento, com uma altura média de 202 cm. Os tratamentos déficit hídrico no enchimento de grãos e sem déficit hídrico resultaram em altura de plantas de 223 cm e 225 cm, respectivamente.

Brito *et al.* (2013) não observaram diferença significativa na altura de plantas de milho doce em condições a campo sob a influência de cinco lâminas de água num experimento desenvolvido em Pombal, PB. O trabalho experimental foi conduzido pelos referidos autores até 90 DAS e tinha como finalidade avaliar a resposta fitotécnica de milho doce em função dos seguintes níveis de água no solo: 40%, 60%,

80%, 100% e 120% da ETm. O momento inicial da aplicação dos tratamentos de água deu-se 30 DAS.

Entretanto, com relação ao balanço catiônico, Medeiros *et al.* (2008) verificaram uma redução linear na altura de plantas de milho sob as proporções Ca:Mg no solo. No referido estudo, os autores avaliaram o efeito das relações Ca:Mg 1:1, 2:1, 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1 sobre a resposta biológica do milho cultivado em casa de vegetação durante 45 dias. Avaliando o efeito das relações Ca:Mg no solo de 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 e 6:1 sobre a altura de plantas de milho, Lange *et al.* (2021) não observaram diferenças significativas sobre a variável-resposta mediante influência das relações molares Ca:Mg, tendo a altura de plantas de milho assumido valor médio de 167 cm.

O diâmetro de colmo não foi condicionado pelos níveis de suprimento hídrico e proporções de Ca:Mg do solo (Tabela 18). As plantas de milho apresentaram diâmetro médio de 16,6 mm. Entretanto, o diâmetro de colmo pode ser considerado uma variável sensível ao estresse, pois representa órgãos produtores e armazenadores de carboidratos na cultura do milho (Duarte, 2006 *apud* Brito *et al.*, 2013, p. 1247).

Pias *et al.* (2017) não encontraram diferença significativa para diâmetro de colmo de milho cultivado em casa de vegetação em função da aplicação de déficit hídrico, com valor médio de 11,9 mm. Entretanto, Brito *et al.* (2013) constataram um aumento linear da referida variável sob a influência de diferentes regimes de água no solo. Um aumento de 0,9 mm no diâmetro de colmo foi observado para cada incremento de 20% na lâmina de irrigação definida em função da ETm.

Lange *et al.* (2021) identificaram diferença significativa do diâmetro de colmo de milho em função do balanço catiônico. As relações Ca:Mg 1:1 e 5:1 resultaram em menores valores de diâmetros de colmo. Os valores médios oscilaram entre 8,55 mm para a relação 1:1 e 10,05 mm para a relação 4:1.

5.3.4 Massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), porcentagem de massa seca (PMS), massa seca de raiz (MSR) e relação massa seca de raiz e massa seca de parte aérea de plantas de milho (RRPA)

A MFPA não foi significativamente afetada pela relação Ca:Mg (Tabela 19). Sob a imposição do tratamento status de água no solo, as plantas sofreram efeito quadrático do fator em estudo sobre esta variável-resposta, como ilustra a Figura 76. Os valores médios de MFPA oscilaram de 311,6 g a 426,7 g sob 60% e 100% da ETm, respectivamente.

Um aumento linear da MFPA de milho doce com o incremento do suprimento hídrico do solo foi obtido por Brito *et al.* (2013). Em função da aplicação das lâminas de água correspondentes a 40%, 60%, 80%, 100% e 120% da ET_m, o valor máximo da MFPA foi superior a 400 g planta⁻¹ sob o tratamento correspondente ao maior suprimento de água no solo. A menor MFPA foi atribuída ao menor nível de suprimento de água no solo com valor médio em torno de 300 g planta⁻¹.

Tabela 19 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), porcentagem de massa seca (PMS), massa seca de raiz (MSR) e relação massa seca de raiz e massa seca de parte aérea de plantas de milho (RRPA) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		MFPA	MSPA	PMS
Água (W)	3	33978,3333**	2828,7333**	15,5457**
Ca:Mg (R)	3	2070,0000 ^{ns}	110,9667 ^{ns}	0,5293 ^{ns}
W x R	9	1864,4444 ^{ns}	110,9222 ^{ns}	1,4733 ^{ns}
C.V. (%)		9,05	9,94	6,67

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios	
		MSR	RRPA
Água (W)	3	47,5567**	0,00093 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	0,8867 ^{ns}	0,00066 ^{ns}
W x R	9	3,2322 ^{ns}	0,00066 ^{ns}
C.V. (%)		22,13	19,93

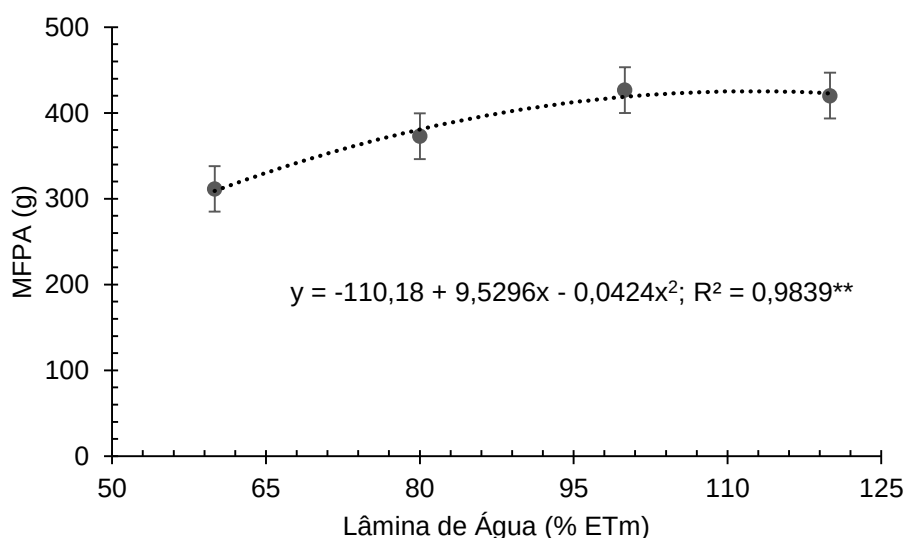
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

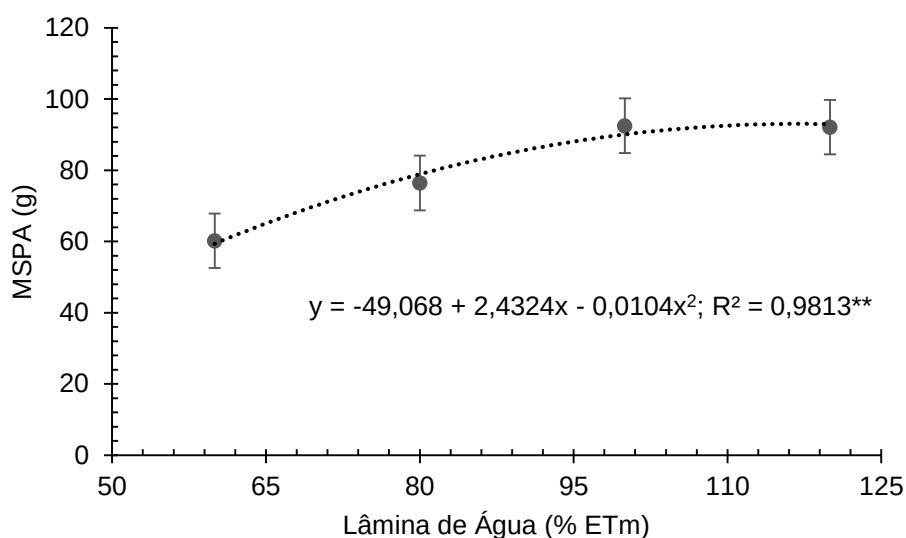
Figura 76 – Massa fresca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

A MSPA não sofreu efeito em função do balanço catiônico, porém essa variável foi condicionada pelo suprimento hídrico do solo (Tabela 19). Um modelo de regressão quadrático foi descrito para expressar a MSPA em função dos níveis de água no solo (Figura 77). Seus valores máximo e mínimo foram de 92,5 g e 60,2 g sob a aplicação das lâminas de água correspondente a 100% e 60% da ETm, respectivamente.

Figura 77 – Massa seca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Reduções de 18,24% e 24,36% na MSPA em relação ao tratamento irrigação plena foram observadas sob a imposição do tratamento restrição hídrica nas fases de pendoamento e enchimento de grãos, respectivamente por Pias *et al.* (2017) na cultura do milho conduzido em ambiente protegido. Os valores médios obtidos referente a variável-resposta foram de 122,84 g, 100,44 g e 92,92 g para os manejos de água sem déficit hídrico (T1), déficit hídrico no pendoamento (T2) e déficit hídrico no enchimento de grãos (T3).

Com objetivo de investigar a influência de diferentes níveis de umidade do solo sobre algumas variáveis morfológicas de dois híbridos de milho, J. R. da Costa, Pinho e Parry (2008) conduziram um experimento com a referida espécie vegetal em casa de vegetação. Para avaliar o efeito do estresse hídrico sobre a referida cultura, os referidos autores aplicaram quatro níveis de água no solo em dois estádios fenológicos. Os tratamentos referentes ao déficit hídrico foram definidos em função da água disponível no solo (AD): 100% de AD, 75% de AD, 50% de AD e PMP. Esses

tratamentos relacionados aos níveis de água no solo foram aplicados no estágio vegetativo (35 a 44 DAG – Dias Após a Germinação) e reprodutivo (51 a 70 DAG). Plantas submetidas ao estresse hídrico no estágio vegetativo não sofreram estresse hídrico na fase reprodutiva. Em contrapartida, plantas submetidas à deficiência hídrica na fase reprodutiva não sofreram estresse hídrico na fase vegetativa. A MSPA foi afetada pelo status de água no solo nos dois híbridos submetidos aos tratamentos de estresse hídrico. Mediante imposição de deficiência hídrica no subperíodo vegetativo, os valores médios de MSPA foram de 132,54; 95,93; 82,38 e 64,05 g sob 100% de AD, 75% de AD, 50% de AD e PMP, respectivamente para o híbrido M-21. Os valores médios de MSPA do híbrido BR-106 foram de 147,20; 111,43; 93,13 e 75,65 g sob 100% de AD, 75% de AD, 50% de AD e PMP, respectivamente. Diante de déficit hídrico aplicado no estágio reprodutivo, a MSPA foi de 135,72; 110,45; 97,23 e 84,08 g sob 100% de AD, 75% de AD, 50% de AD e PMP, respectivamente para o híbrido M-21. O híbrido BR-106 apresentou valores médios de MSPA de 133,55; 131,43; 115,65 e 88,23 g sob 100% de AD, 75% de AD, 50% de AD e PMP, respectivamente.

Para o cultivo de milho doce em condições a campo no município de Pombal – PB, Brito *et al.* (2013) verificaram que a massa seca de colmo e de folhas aumentou linearmente em função da disponibilidade hídrica. Para cada incremento de 20% na lâmina de água no solo a massa seca de colmo e de folhas sofreu aumento de 47,55% e 12,77%, respectivamente.

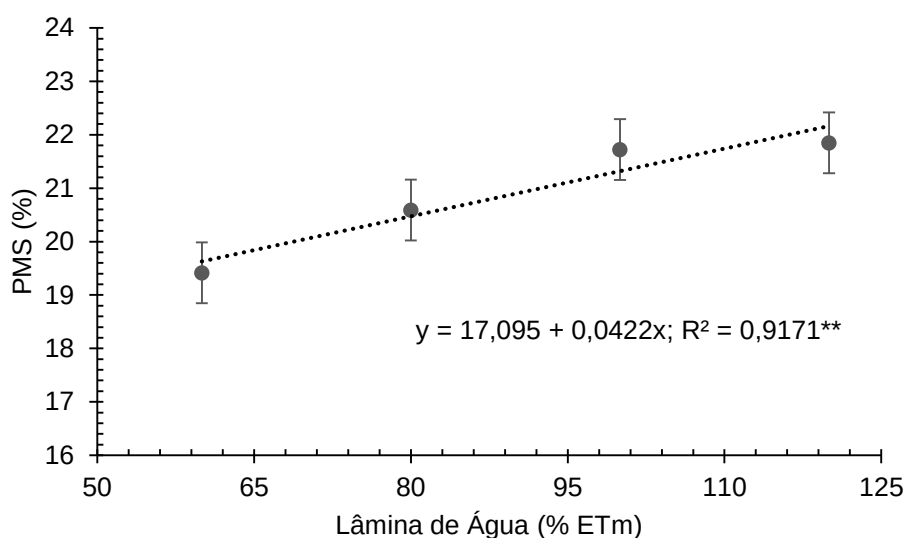
O estresse hídrico reduz o rendimento de massa seca e a produtividade das culturas agrícolas, uma vez que tal redução dependerá das proporções sob as quais o estresse hídrico venha a comprometer as áreas de captura de energia solar pelo limbo foliar para assegurar a atividade fotossintética dentro de um ótimo de eficiência fisiológica, bem como do grau de recuperação das plantas depois de interrompidos os episódios de deficiência hídrica (Hsiao, 1973; Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997; Marschner, 1995).

Com a finalidade de avaliar a influência das relações Ca:Mg no solo de 0,5:1; 1:1; 2:1; 4:1 e 8:1 sobre a MSPA do milho conduzido em ambiente protegido, Luciano Junior (2018) não detectou diferenças significativas decorrentes da imposição dessas relações molares. A colheita da parte aérea foi realizada no momento que as plantas atingiam estatura média de 40 cm. Os valores médios de MSPA aferidos foram de 4,7 g e 3,9 g para plantas cultivadas em um Latossolo Bruno Distroférico típico e Latossolo Bruno Aluminoférico típico, respectivamente.

Entretanto, Medeiros *et al.* (2008) verificaram comportamento quadrático da MSPA das plantas de milho em função das proporções molares de Ca e Mg no solo. A MSPA das plantas de milho decresceu com o aumento das relações Ca:Mg aplicadas (1:1, 2:1, 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1). Analisando o efeito de seis proporções de Ca:Mg no solo compreendidas entre 1:1 e 6:1 sobre a MSPA de milho, Lange *et al.* (2021) constataram diferença significativa entre os tratamentos. A MSPA apresentou variação de 53,9 g para relação 4:1 e 28,9 g para relação 1:1.

A PMS de milho foi negativamente impactada pelas relações Ca:Mg no solo (Tabela 19). Porém, distintos níveis de água no solo influenciaram consideravelmente o desempenho dessa variável-resposta. As plantas apresentaram incremento linear em função dos diferentes níveis de suprimento hídrico do solo (Figura 78). Os valores máximo e mínimo da porcentagem de massa de seca de parte aérea foram 21,85% e 19,41% sob aplicação das lâminas de água correspondentes a 120% e 60% da ETm, respectivamente. Constata-se que a PMS apresentou comportamento semelhante a MFPA e MSPA, evidenciando que a PMS está totalmente relacionada a essas duas variáveis.

Figura 78 – Porcentagem de massa seca de parte aérea de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

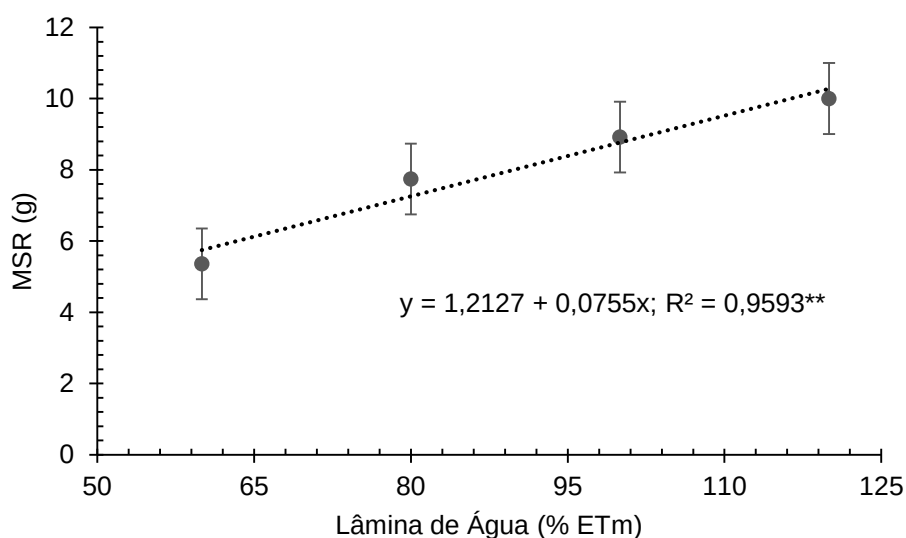


Fonte: O autor

A MSR não foi condicionada pelo balanço de cátions do solo, porém os níveis de água no solo afetaram significativamente essa variável-resposta (Tabela 19). Não foi observado efeito de interação entre status de água no solo e relações Ca:Mg do

solo para MSR. Essa variável-resposta sofreu aumento linear em função da imposição dos diferentes níveis de umidade do solo (Figura 79). Os valores médios de MSR oscilaram de 5,36 g a 10,01 g sob 60% e 120% da ETm, respectivamente.

Figura 79 – Massa seca de raiz de milho em função de diferentes níveis de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com o objetivo de avaliar a resposta fitotécnica do milho em condições de ambiente protegido, J. R. da Costa, Pinho e Parry (2008) não verificaram efeito do status de água no solo sobre a MSR de milho. Os valores médios de MSR foram de 42,82 e 50,08 g para os híbridos M-21 e BR-106, respectivamente, mediante estresse hídrico aplicado durante o estágio vegetativo da cultura. Sob estresse hídrico aplicado durante o estágio reprodutivo, a MSR foi de 58,75 e 63,64 g para os híbridos M-21 e BR-106, respectivamente.

Examinando a influência das relações Ca:Mg sobre a MSR de milho, Lange *et al.* (2021) observaram que as relações Ca:Mg 4:1, 5:1 e 6:1 proporcionaram maiores valores médios da referida variável. A MSR variou entre 12,29 g sob relação 6:1 e 8,59 g sob relação 1:1.

A RRPA não foi comprometida pelos fatores balanço catiônico e status de água no solo (Tabela 19). Para esta variável-resposta não foi identificado nenhum efeito de interação entre os fatores em estudo. O valor médio da RRPA das plantas de milho conduzido em ambiente protegido foi de 0,0989.

Conduzindo um experimento de milho no interior de uma casa de vegetação sob condições climáticas de Passo Fundo, RS, Pedersen (2013) não observou efeito de status de água no solo sobre a RRPA. Os tratamentos de água aplicados foram 85%, 90%, 95% e 100% da capacidade de vaso. Os valores médios de RRPA sofreram uma variação de 0,25 a 0,28 para o primeiro experimento e uma variação de 0,31 a 0,36 no segundo experimento. Lange *et al.* (2021), avaliando RRPA em milho cultivado em casa de vegetação, constataram que as proporções Ca:Mg 3:1, 4:1 e 5:1 apresentaram maior relação entre as referidas variáveis. Seus valores máximo e mínimo foram de 4,5 e 3,3 sob as relações Ca:Mg de 4:1 e 1:1, respectivamente.

Chaganti *et al.* (2021) verificaram que a produtividade de milho não foi afetada significativamente pelas diferentes relações Ca:Mg obtidas mediante aplicações de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e sulfato de magnésio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) entre os anos de 2015 a 2020. Esses resultados foram obtidos por ocasião do cultivo de milho a campo nos municípios de Hirzel e West Badger, Ohio, EUA.

A alta disponibilidade de Ca é muito importante para o desenvolvimento da planta por auxiliar no crescimento do sistema radicular e no estabelecimento da cultura. O Ca é essencial para manter a integridade das membranas e das paredes celulares, conferindo maior resistência dos tecidos vegetais ao congelamento de seiva. A sua deficiência provoca ruptura das membranas plasmáticas e, assim, a ligação do Ca com a pectina da parede celular é afetada. Quando as células vegetais crescem, aumenta a superfície de contato entre elas, aumentando também a necessidade do suprimento de Ca na rizosfera (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

De acordo com Medeiros *et al.* (2008), um aumento na saturação do solo por Ca pode provocar desbalanço nutricional pela absorção preferencial deste nutriente, em detrimento de íons Mg^{2+} e K^+ . A deficiência de Mg tem como sintoma característico a clorose entre nervuras foliares identificada primeiramente em folhas mais velhas, devido à alta mobilidade deste íon na planta (Taiz *et al.*, 2017). Com relação ao K, a sua deficiência tem como primeiro sintoma visível uma clorose em mancha ou marginal, que depois evolui para uma necrose, com maior frequência nos ápices foliares, nas margens e entre as nervuras (Taiz *et al.*, 2017).

Além do potencial do solo em fornecer nutrientes para as plantas, a importância da relação Ca:Mg também está relacionada com a necessidade de cada espécie cultivada, do estágio de desenvolvimento da cultura e com os mecanismos que determinam o movimento de Ca e Mg na solução do solo (Luciano Junior, 2018).

5.3.5 Fotossíntese líquida (*A*), Condutância estomática (*G_s*), Concentração de carbono intercelular (*C_i*), Transpiração foliar (*E*), Eficiência fotossintética do uso da água (*EUA*) e Eficiência de carboxilação (*EC_i*)

Na Tabela 20 são apresentados os parâmetros fisiológicos determinados para a cultura do milho sob condições de ambiente protegido. A fotossíntese líquida (*A*) não diferiu estatisticamente ao nível de 95% de confiabilidade para as quatro épocas de avaliação sob a influência das proporções de Ca:Mg no solo. Essa variável fisiológica foi descrita por um modelo de regressão quadrático em função do status de água no solo aos 37 DAE (Figura 80). Seus valores médios oscilaram de 20,6 a 39,2 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob os níveis de água no solo correspondentes a 60% e 100% da ET_m, respectivamente. Nas épocas de avaliação de 48 e 58 DAE, a *A* não foi governada pelos fatores em estudo. As plantas de milho apresentaram *A* variando de 34,9 a 38,8 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 48 DAE e de 25,5 a 31,2 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 58 DAE. Os menores valores de *A* monitorados aos 58 e 69 DAE são atribuídos às altas temperaturas máximas registradas nestes dias (36,0°C).

Efeito de interação entre níveis de umidade do solo e relações Ca:Mg foi observado aos 69 DAE. *A* reduziu linearmente em função dos níveis de água no solo sob a proporção Ca:Mg 3:1, com valores máximo e mínimo de 33,8 e 24,0 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob 60% e 120% da ET_m, respectivamente (Figura 81). Uma redução linear da *A* foi identificada sob suprimento hídrico de 60% da ET_m em função do balanço de cátions, com valores oscilando de 23,6 a 33,8 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob as relações Ca:Mg de 9:1 e 3:1, respectivamente (Figura 82).

No processo fotossintético, a água possui grande importância para a liberação de prótons e elétrons da etapa fotoquímica e na regulação da abertura estomática, tornando possível a absorção de CO₂ atmosférico e a mobilização de fotoassimilados (Chavarria; Santos, 2012). Em condições de déficit hídrico, a inibição da fotossíntese ocorre devido ao fechamento estomático que limita a difusão de CO₂ para as células do mesófilo foliar (Fioreze *et al.*, 2013; Jadoski; Klar, 2011). De acordo com Kaiser (1987), se a deficiência hídrica for severa e prolongada, a desidratação, além de afetar a fotossíntese devido a limitação do fluxo de CO₂, tem efeitos prejudiciais sobre o aparelho fotossintético.

Tabela 20 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para os parâmetros fisiológicos do milho determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*G_s*), concentração de carbono intercelular (*C_i*), transpiração foliar (*E*), eficiência fotossintética de uso de água (*EUA*), eficiência de carboxilação (*EC_i*) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		37 DAE					
		<i>A</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>E</i>	<i>EUA</i>	<i>EC_i</i>
Água (W)	3	902,3000**	0,0740**	3619,3333 ^{ns}	12,5470**	2,6060 ^{ns}	0,0253**
Ca:Mg (R)	3	32,1000 ^{ns}	0,0066 ^{ns}	2139,3333 ^{ns}	0,7240 ^{ns}	1,5187 ^{ns}	0,0009 ^{ns}
W x R	9	10,6111 ^{ns}	0,0035 ^{ns}	3573,1111 ^{ns}	0,3449 ^{ns}	1,2581 ^{ns}	0,0032 ^{ns}
C.V. (%)		27,54	36,82	34,41	26,06	17,94	36,32
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		48 DAE					
		<i>A</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>E</i>	<i>EUA</i>	<i>EC_i</i>
Água (W)	3	39,4733 ^{ns}	0,0129 ^{ns}	3029,0000 ^{ns}	1,1640 ^{ns}	0,6187 ^{ns}	0,0041 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	14,6133 ^{ns}	0,0078 ^{ns}	814,0000 ^{ns}	0,4503 ^{ns}	0,1780 ^{ns}	0,0009 ^{ns}
W x R	9	55,5633 ^{ns}	0,0153 ^{ns}	2528,2222 ^{ns}	1,3676 ^{ns}	0,8899 ^{ns}	0,0017 ^{ns}
C.V. (%)		15,16	33,34	33,87	21,46	9,27	20,97
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		58 DAE					
		<i>A</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>E</i>	<i>EUA</i>	<i>EC_i</i>
Água (W)	3	69,9633 ^{ns}	0,0082**	1785,5667**	2,4553*	0,2693 ^{ns}	0,0028 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	25,6633 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	293,8333 ^{ns}	1,0073 ^{ns}	0,1330 ^{ns}	0,0013 ^{ns}
W x R	9	39,5033 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	346,5556 ^{ns}	0,9447 ^{ns}	0,2927 ^{ns}	0,0053 ^{ns}
C.V. (%)		17,48	24,33	20,58	18,70	9,40	19,77
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		69 DAE					
		<i>A</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>E</i>	<i>EUA</i>	<i>EC_i</i>
Água (W)	3	7,5700 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	381,6667 ^{ns}	0,0173 ^{ns}	0,7467 ^{ns}	0,0135 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	9,4833 ^{ns}	0,0027 ^{ns}	1137,6667 ^{ns}	0,3178 ^{ns}	0,5257 ^{ns}	0,0086 ^{ns}
W x R	9	38,1278*	0,0036 ^{ns}	1254,5556 ^{ns}	0,6008 ^{ns}	0,6739 ^{ns}	0,0117 ^{ns}
C.V. (%)		13,68	28,11	29,42	19,61	10,06	25,94

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

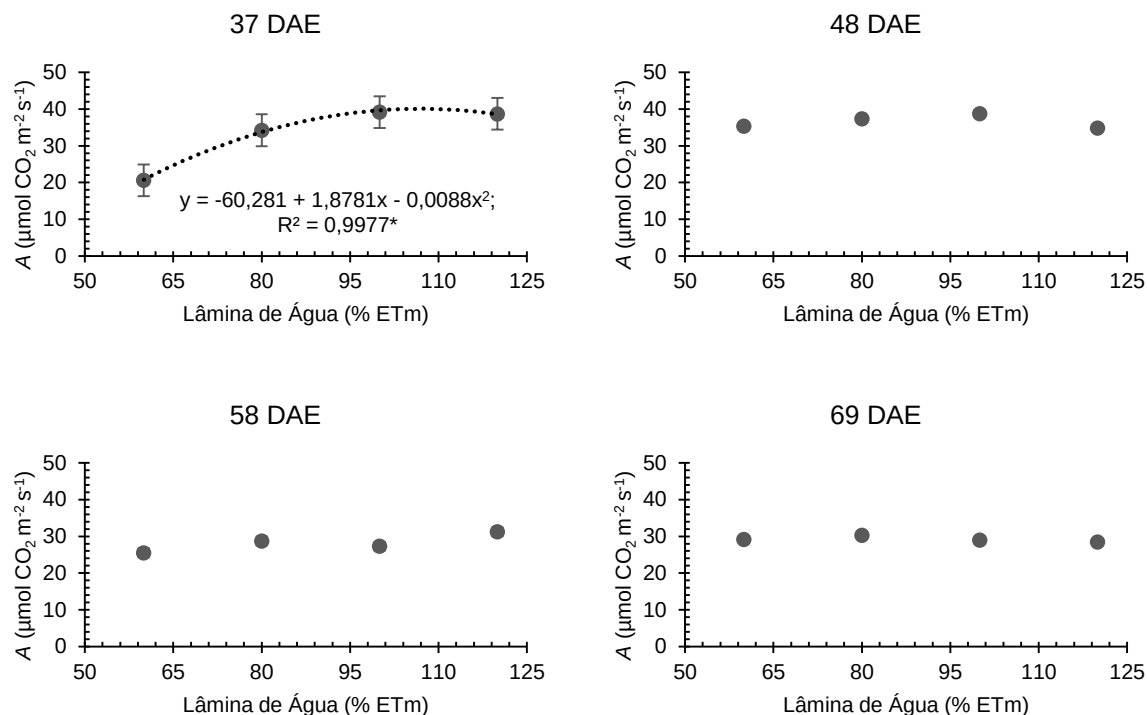
*,** - significativo a 5% e 1%, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

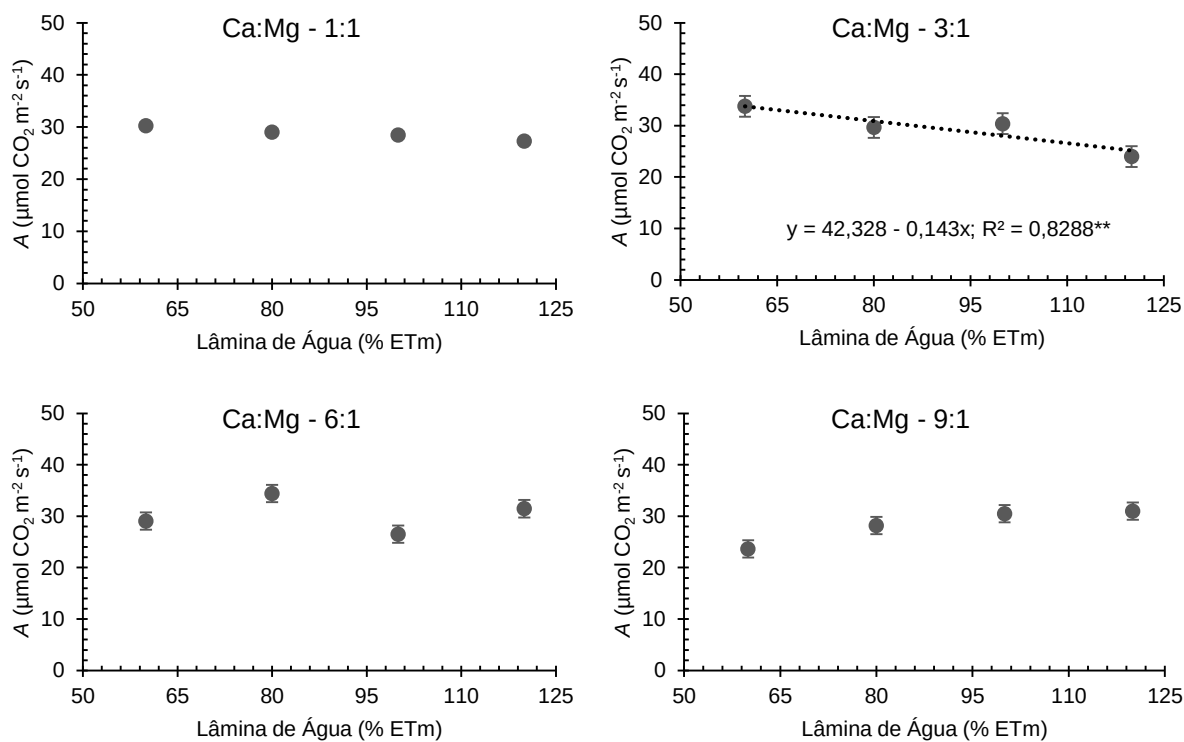
As reações bioquímicas da fotossíntese são afetadas pela temperatura resultando em respostas complexas (Taiz *et al.*, 2017), em que plantas C₄ atingem maiores valores de fotossíntese em temperaturas na faixa de 30-40°C (Kerbaui, 2004). Nas espécies C₄, a produtividade quântica da fixação fotossintética de carbono permanece constante com a temperatura, demonstrando menores taxas de fotorrespiração (Taiz *et al.*, 2017).

Figura 80 – Fotossíntese líquida de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



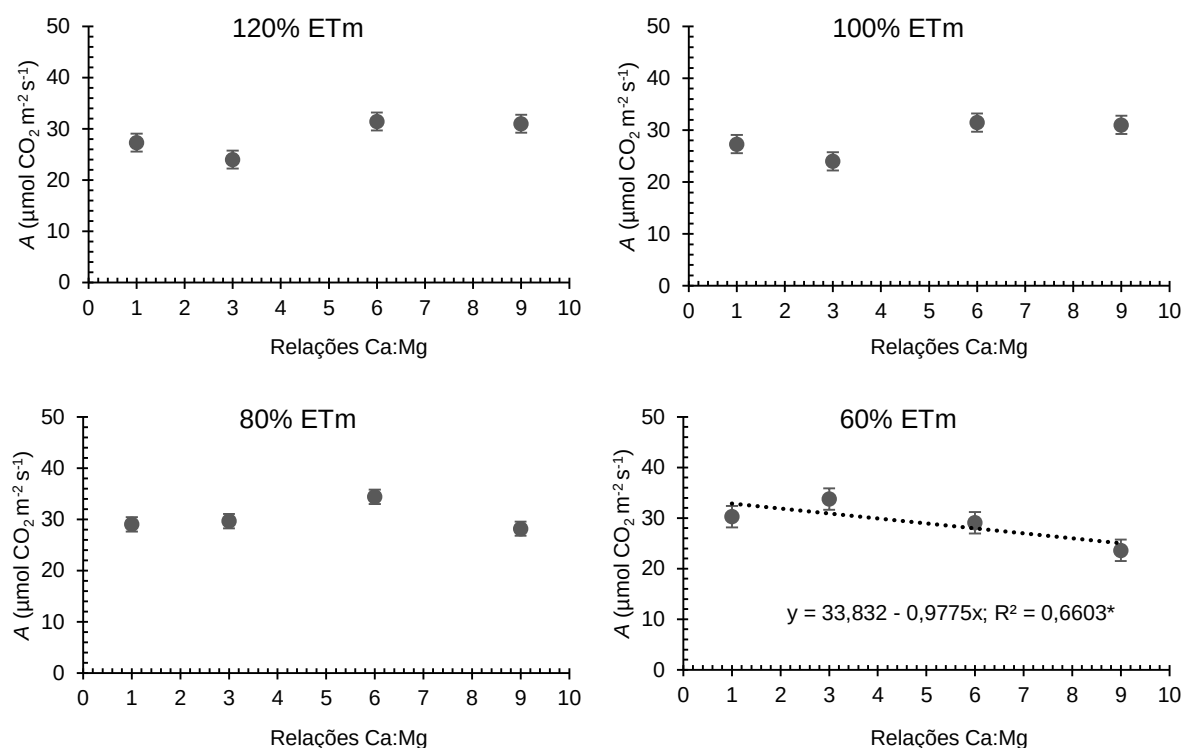
Fonte: O autor

Figura 81 – Fotossíntese líquida de plantas de milho em função de diferentes níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condições climáticas de ambiente protegido aos 69 DAE. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 82 – Fotossíntese líquida de plantas de milho em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido aos 69 DAE. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



Fonte: O autor

Com a finalidade de avaliar variáveis fisiológicas do milho em condições de clima semiárido, Anjos *et al.* (2022) conduziram um trabalho experimental sob condições a campo no município de Pão de Açúcar, AL. Foram utilizadas seis lâminas de irrigação correspondentes a 50%, 75%, 100%, 125%, 150% e 175% da ETo. As melhores taxas de A foram obtidas mediante adoção de lâmina de água correspondente a 100% da ETo. Plantas cultivadas com irrigação deficiente apresentaram redução significativa de A . Seus valores máximo e mínimo avaliados foram de 22,49 e 11,01 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Visando caracterizar linhagens de milho quanto a resistência à seca no estágio de florescimento pleno, Magalhães *et al.* (2009) conduziram um experimento com a referida cultura cultivada em vasos sob ambiente protegido. Neste trabalho, foram aplicados dois tratamentos hídricos no pré-florescimento: sem e com deficiência hídrica. No tratamento sem deficiência de água, a reposição hídrica foi realizada diariamente até o solo atingir a umidade na capacidade de vaso. Para o tratamento com deficiência hídrica, aplicou-se 50% da água total disponível, induzindo assim o estresse hídrico. Taxas de A das plantas de milho variaram significativamente em

função do suprimento hídrico do solo. Plantas submetidas a déficit hídrico apresentaram A de $10,28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ao passo que plantas sob irrigação plena apresentaram A de $37,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

A fim de quantificar o efeito do status de água no solo sobre a resposta biológica do milho, Freire (2020) conduziu um experimento em ambiente protegido no município de Recife, PE com as plantas expostas a cinco níveis de umidade do solo (80; 90; 100; 110 e 120% da umidade equivalente à capacidade de campo – CC) em duas formas de adubação (convencional e via água de irrigação). Um incremento linear da A foi observado sob os níveis de umidade do solo com valores oscilando de 33,63 a $38,19 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob 80% e 120% da CC, respectivamente.

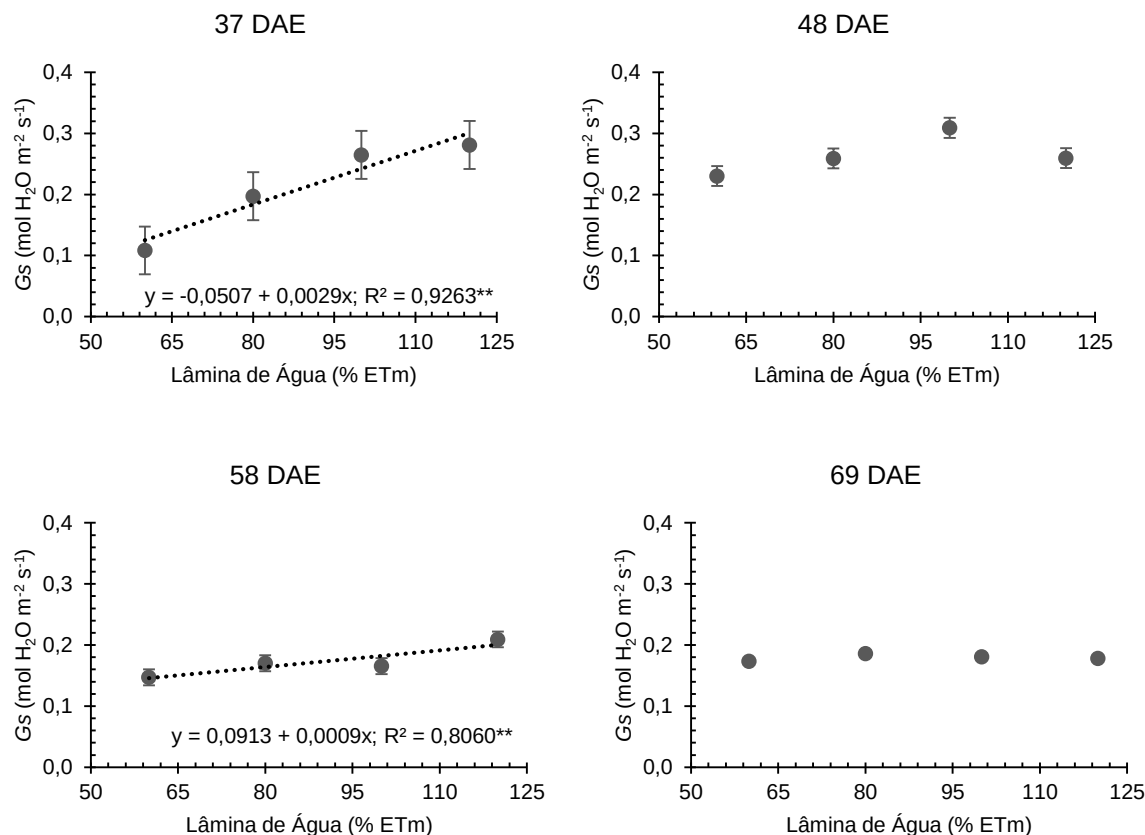
A de milho doce conduzido por Brito *et al.* (2013) no município de Pombal, PB foi descrita por um modelo de regressão linear simples. Um aumento de 10,09% na A foi encontrado para cada aumento de 20% da ETm. Com um valor médio de $18,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a A foi inferior a $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob suprimento de água no solo de 40% da ETm. Sob nível de água no solo de 80% da ETm, A foi superior a $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

A G_s não foi afetada pelas relações Ca:Mg do solo para todas as épocas de avaliação (Tabela 20). Entretanto, a G_s foi condicionada pelo status de água no solo aos 37 e 58 DAE, apresentando aumento linear sob maiores níveis de suprimento hídrico (Figura 83). Os valores máximo e mínimo da G_s determinados aos 37 DAE foram de 0,28 e 0,11 mol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob 120% e 60% da ETm, respectivamente. Nas leituras realizadas 58 DAE, os valores oscilaram de 0,15 a 0,21 mol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob 60% e 120% da ETm, respectivamente.

Os valores de G_s obtidos por Anjos *et al.* (2022) foram afetados substancialmente pelo status de água no solo. Em condições de suprimento hídrico adequado, a G_s foi significativamente maior com valores médios de $0,09 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sob 100% e 125% de ETo. O nível de água associado a 50% de ETo resultou em G_s médio de $0,04 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Magalhães *et al.* (2009) analisando a cultura do milho em condições de ambiente protegido verificaram que a G_s foi afetada pelo status de água no solo. Seus valores médios obtidos pelos autores foram de $0,242 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em plantas sob suprimento adequado de água no solo e $0,035 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em plantas submetidas a condições de deficiência hídrica.

Figura 83 – Condutância estomática de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Os valores médios de G_s obtidos por Freire (2020) para a cultura do milho conduzida em ambiente protegido demonstraram um comportamento linear em função dos níveis de umidade do solo. A G_s do milho apresentou valores oscilando de 0,215 a 0,259 mol de H_2O m^{-2} s^{-1} sob lâminas de água correspondente a 80% e 120% da CC, respectivamente.

Na condução de um experimento com milho doce sob as condições climáticas de Pombal, PB, Brito *et al.* (2013) observaram um comportamento linear da G_s em função do suprimento de água no solo. A G_s foi a variável fisiológica mais sensível ao estresse hídrico, assumindo valor médio de 0,20 mol de H_2O m^{-2} s^{-1} . O valor médio máximo da G_s foi superior a 0,24 mol de H_2O m^{-2} s^{-1} sob lâminas de água correspondentes a 80% da ETm. Sob lâminas de água correspondentes a 40% da ETm foi obtido o valor mínimo de G_s inferior a 0,18 mol de H_2O m^{-2} s^{-1} .

Segundo Brito *et al.* (2013), em condições de estresse hídrico, a planta fecha os seus estômatos para reduzir a perda de água e manter a turgescência, refletindo na formação de carboidratos na fotossíntese e no acúmulo de fitomassa na planta,

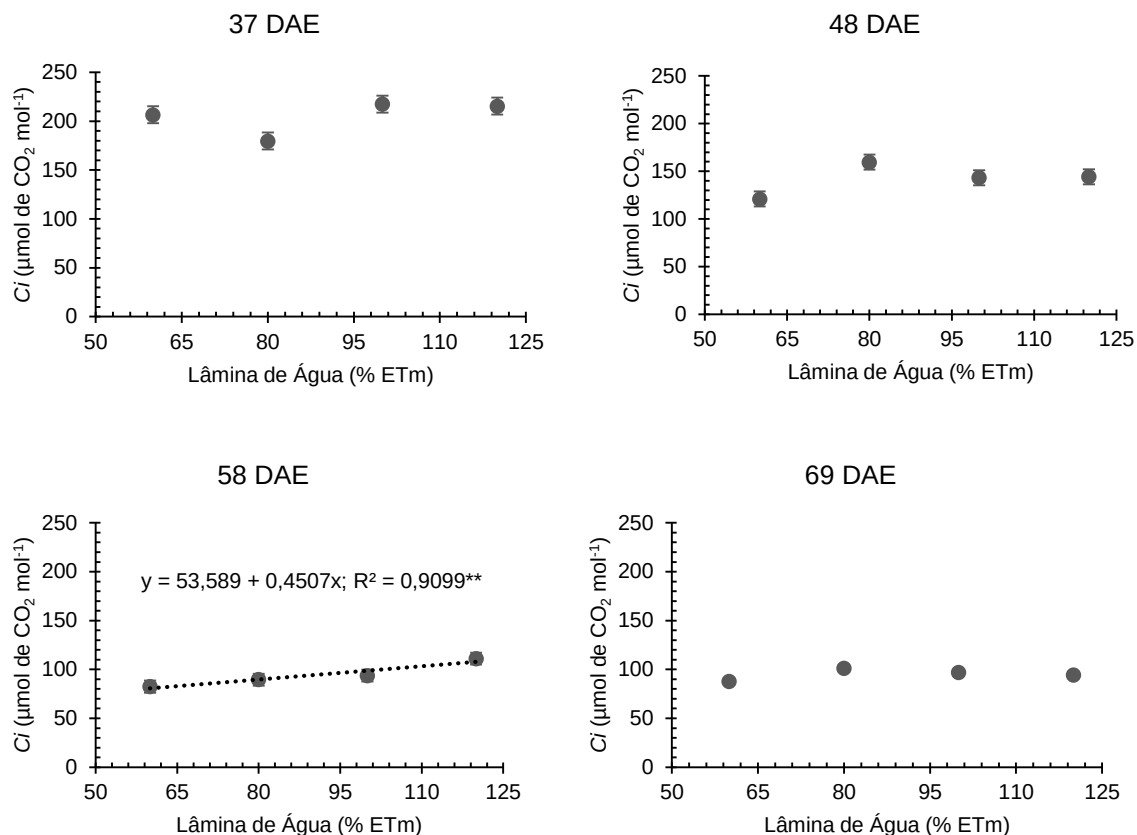
principalmente do caule. Anjos *et al.* (2022) afirmam que aproximadamente dois terços da redução da assimilação de CO₂ estão relacionados a depleção da Gs. Conforme a hidratação das células diminui e a planta passa a sofrer os efeitos do déficit hídrico, a concentração de ácido abscísico e de solutos aumenta na planta, principalmente no sistema radicular (Chavarria; Santos, 2012). Esses fatores afetarão negativamente a Gs e, conseqüentemente, a atividade fotossintética, culminando na redução da síntese de proteínas e da espessura das paredes celulares, bem como na diminuição da expansão celular (Taiz *et al.*, 2017).

Para a *Ci* constatou-se efeito significativo do fator nível de água no solo aos 58 DAE (Tabela 20). A respectiva variável fisiológica demonstrou incremento linear com o aumento da disponibilidade hídrica (Figura 84). Os valores máximo e mínimo de *Ci* foram de 111,1 e 82,4 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ sob 120% e 60% da ETm, respectivamente. Para as avaliações realizadas nas demais épocas, não se observou efeito em função do status de água no solo. A *Ci* variou de 179,7 a 217,5 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ aos 37 DAE, de 121,0 a 159,6 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ aos 48 DAE e de 87,7 a 101,2 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ aos 69 DAE. A *Ci* não foi governada pelo balanço catiônico no solo para as quatro épocas de análise. Efeito de interação entre os fatores níveis de água no solo e relação Ca:Mg também não foi observado.

Um incremento de 18% na *Ci* foi obtido por Freire (2020) comparando-se plantas submetidas ao nível de suprimento de água no solo de 80% da CC (36,57 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e 120% da CC (44,62 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A referida autora afirma que o acréscimo na diferença entre tudo que é produzido pela fotossíntese no interior dos cloroplastos e o que é consumido pela respiração influencia a produção agrícola e está diretamente relacionado com a taxa de concentração de CO₂ nos estômatos, que aumenta com o incremento do suprimento hídrico do solo.

Brito *et al.* (2013), procedendo cultivo de milho doce no município de Pombal, PB, não constataram diferenças significativas de *Ci* das plantas de milho em decorrência do status de água no solo. O valor médio de *Ci* reportado pelos autores foi de 144,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em função da adoção das lâminas de água de 40%, 60%, 80%, 100% e 120% da ETm.

Figura 84 – Concentração de carbono intercelular de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



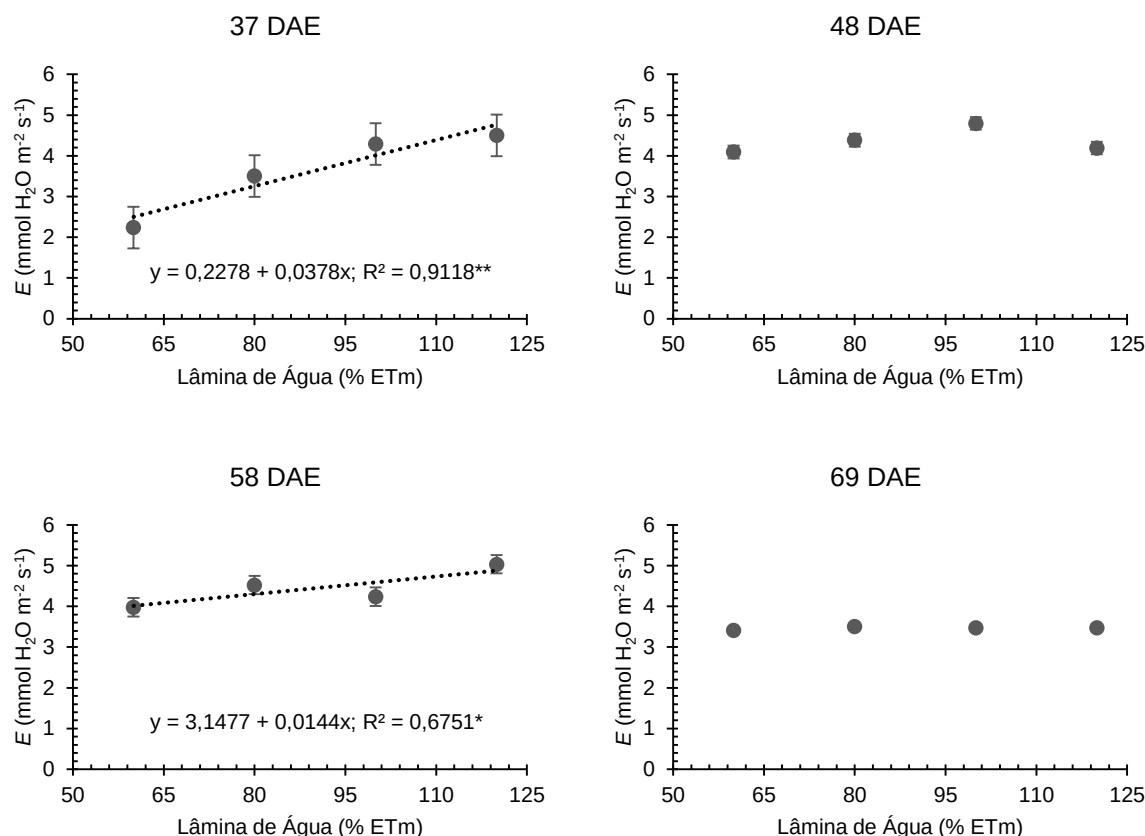
Fonte: O autor

A E das plantas de milho foi influenciada significativamente em virtude dos níveis de água no solo aos 37 e 58 DAE (Tabela 20). De acordo com a Figura 85, E aumentou linearmente em função do status de água no solo, com valores máximo e mínimo de 4,5 e 2,2 mols de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente aos 37 DAE. Os valores máximo e mínimo de E medidos aos 58 DAE foram de 5,0 e 4,0 mols de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Nas demais épocas de avaliação, a E das plantas de milho não foram afetadas pelo suprimento hídrico do solo, com valores oscilando de 4,1 a 4,8 mol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 48 DAE e 3,4 a 3,5 mol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 69 DAE. A E não foi influenciada pelo de balanço de cátions do solo.

Nota-se que a tendência de incremento linear da E coincidiu com o aumento verificado para a G_s aos 37 e 58 DAE. Uma relação direta entre a G_s e a E é esperada, devido a redução da difusão de fluxo de vapor d'água para a atmosfera terrestre e, consequentemente, da E , à medida que se intensifica o incremento da resistência estomática (Gonçalves *et al.*, 2010). Jadoski e Klar (2011) reportaram que a G_s pode ser compreendida como um importante mecanismo fisiológico que as plantas

vasculares apresentam para o controle da transpiração. Segundo Zhu, Long e Ort (2010), a transpiração foliar é essencial para dissipar o excesso de energia absorvida pelas folhas, e a redução do suprimento de água no solo limita o controle da temperatura no dossel da planta.

Figura 85 – Transpiração foliar de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Anjos *et al.* (2022) encontraram maiores taxas de E sob condições de irrigação plena no milho cultivado a campo na região Semiárida de Alagoas. Os valores médios de E oscilaram de 2,27 a 4,46 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ sob lâminas de água correspondentes a 50% e 100% da E_{To} , respectivamente.

A E de milho conduzido em casa de vegetação por Magalhães *et al.* (2009) foi influenciada significativamente pela disponibilidade hídrica do solo. As plantas referentes ao tratamento sem déficit hídrico apresentaram E de 8,009 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em contrapartida, sob condições de estresse hídrico E do milho foi de 1,181 $\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Um modelo de regressão quadrático descreveu a E de plantas de milho doce semeadas por Brito *et al.* (2013) em função da disponibilidade de água no solo, com

valor médio de E de 3,32 mmol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$. O valor máximo de E foi obtido mediante adoção do tratamento 95% da ETm, o qual assumiu valor equivalente a 3,62 mmol de $\text{H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Por ocasião da condução de um experimento sob condições de ambiente protegido na província de Shaanxi, China, Y. Wu, Huang e Warrington (2011) verificaram uma redução na transpiração total do milho com a redução do status de água no solo. O experimento foi conduzido em vasos utilizando os seguintes tratamentos de água: 100%, 90%, 80%, 70%, 60% e 50% da capacidade de vaso. Para níveis de água no solo inferiores a 90% da capacidade de vaso a transpiração total do milho foi reduzida. Valores de transpiração total próximos de 120 mm foram obtidos sob tratamentos de água correspondentes a 90% e 100% da capacidade de vaso. Níveis de suprimento hídrico no solo de 50% e 60% da capacidade de vaso resultaram em transpiração total inferior a 40 mm.

As plantas de milho cultivadas sob déficit hídrico moderado aumentam a resistência à difusão de vapor d'água por fechamento parcial dos estômatos e redução da condutância estomática, resultando em menores taxas de assimilação de CO_2 e transpiração (Magalhães *et al.*, 2009). As espécies vegetais podem regular o fechamento estomático para diminuir a perda de água e também alterar as funções metabólicas com a finalidade de inibir a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), como superóxido (O_2^-) e H_2O_2 (Gill; Tuteja, 2010; You; Chan, 2015). X. Wu *et al.* (2021) destacaram que quanto maior a disponibilidade de água para as raízes das plantas, maior será a E e, correspondentemente, a G_s . Dessa forma, de acordo com Jadoski e Klar (2011), à medida que a disponibilidade hídrica diminui, a taxa transpiratória reduz como resultado do fechamento estomático.

A EUA não foi influenciada significativamente pelo status de água no solo e pelo balanço catiônico (Tabela 20). Seus valores médios determinados foram de 9,2; 8,7; 6,5 e 8,6 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$] aos 37, 48, 58 e 69 DAE, respectivamente. Essa variável fisiológica é resultado da razão entre A e E . O fato de tanto A como E terem apresentado respostas semelhantes em função do suprimento de água e da relação Ca:Mg no solo para cada época de avaliação explica a não influência dos tratamentos na EUA .

Por ocasião da condução da cultura do milho em clima semiárido do município de Pão de Açúcar, AL, Anjos *et al.* (2022) constataram que a EUA foi afetada pelo status de água no solo. Os valores máximo e mínimo da EUA foram de 5,07 e 4,37

$[(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}]$ sob lâminas de água correspondentes a 100% e 175% da ETo, respectivamente.

A *EUA* de milho obtida por Magalhães *et al.* (2009) foi afetada pelo status de água no solo. Plantas submetidas ao déficit hídrico apresentaram *EUA* superior em relação aos valores obtidos sem déficit hídrico. Os valores médios de *EUA* foram de 362 e 160 $\mu\text{mol CO}_2 (\text{mol H}_2\text{O})^{-1}$ para plantas conduzidas sob suprimentos limitado e adequado de água no solo, respectivamente.

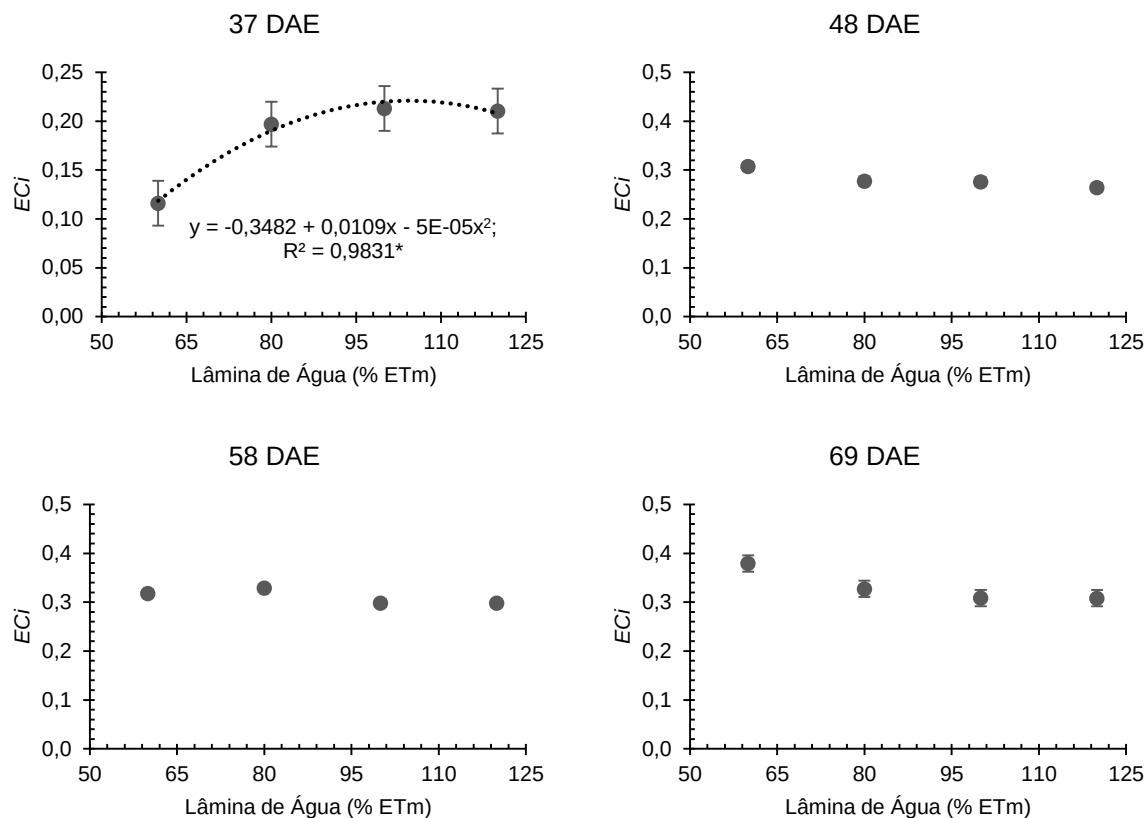
Brito *et al.* (2013) observaram uma redução linear da *EUA* de plantas de milho doce em função do incremento do suprimento de água no solo. O valor médio de *EUA* obtido pelos autores supracitados foi de 1,92 g L^{-1} .

De acordo com Magalhães *et al.* (2009), a *EUA* é uma importante variável fisiológica para identificar híbridos adaptados ao estresse hídrico. Em condições de redução na disponibilidade hídrica do solo, a planta tende a reduzir o fluxo transpiratório e realizar mecanismos de ajuste osmótico, a fim de garantir a absorção de água e manter as células túrgidas (Taiz *et al.*, 2017), destacando que esse processo depende de gastos de energia que podem comprometer a produtividade vegetal (Brito *et al.*, 2013).

As variáveis correspondentes às trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta em condições de estresse hídrico, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusas, restringindo a disponibilidade de CO_2 para assimilação, quanto por limitações metabólicas pelo aumento do efeito inibitório (Glaz; Morris; Daroub, 2004).

A resposta de *ECi* da cultura do milho aos 37 DAE sob ação dos diferentes níveis de umidade do solo foi descrita por um modelo de regressão quadrático (Figura 86). Os valores médios de *ECi* oscilaram de 0,116 a 0,213 $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}]$ mediante aplicação das lâminas de água referentes a 60% e 100% da ETm, respectivamente. Nas demais épocas de análise, não se detectou efeito do suprimento hídrico do solo sobre a referida variável fisiológica (Tabela 20). A *ECi* do milho em função dos níveis de água no solo oscilou de 0,264 a 0,308 $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}]$ aos 48 DAE, de 0,298 a 0,329 $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}]$ aos 58 DAE e de 0,308 a 0,379 $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}]$ aos 69 DAE. Sob o fator balanço de cátions, a *ECi* do milho não foi afetada significativamente.

Figura 86 – Eficiência de carboxilação de milho em função de diferentes níveis de água no solo sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



Fonte: O autor

Freire (2020) observou um aumento linear da EC_i em função do suprimento hídrico do solo. A diferença entre os valores máximo e mínimo foi de 55%, oscilando de 0,734 a 2,102 $[(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de CO}_2^{-1})^{-1}]$ para níveis de umidade de 80% e 120% da CC, respectivamente.

A EC_i obtida por Brito *et al.* (2013) apresentou um valor médio de 0,13 $[(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})/(\text{mmol de CO}_2^{-1})]$ e foi descrita por um modelo de regressão linear simples. O maior valor médio da variável fisiológica em estudo foi próximo de 0,16 $[(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})/(\text{mmol de CO}_2^{-1})]$ sob lâmina de água correspondente a 100% da ETm. Com relação ao menor valor médio, a EC_i foi inferior a 0,12 $[(\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de CO}_2^{-1})^{-1}]$ para uma lâmina de água correspondente a 40% da ETm.

Segundo Freire (2020), elevados valores de C_i podem estar associados a um incremento na EC_i decorrente da disponibilidade de ATP, NADPH e do substrato para a rubisco. A referida autora ainda afirma que a EC_i é uma variável dependente dos fatores quantidade de CO_2 no mesófilo foliar, de luz, de temperatura e da atividade enzimática para que ocorra a fotossíntese e um aumento na produtividade.

Concentrações de CO₂ intercelulares muito baixas fazem com que o influxo deste gás nas células-guardas do mesófilo seja restringido, necessitando, portanto, que a planta utilize o CO₂ atmosférico oriundo da respiração para manter um nível mínimo de taxa fotossintética, tornando-a limitada (Taiz *et al.*, 2017).

5.3.6 Influência do estágio fenológico nos parâmetros fisiológicos

Na Tabela 21 são apresentados os parâmetros fisiológicos do milho em função dos níveis de água no solo e do estágio fenológico da cultura. A variável fisiológica *A* foi condicionada pelo status de água no solo, pelo estágio fenológico da cultura e pela interação entre os tratamentos.

Tabela 21 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para os parâmetros fisiológicos do milho determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*G_s*), concentração de carbono intercelular (*C_i*), transpiração foliar (*E*), eficiência fotossintética de uso de água (*EUA*) e eficiência de carboxilação (*EC_i*) sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		<i>A</i>	<i>G_s</i>	<i>C_i</i>	<i>E</i>	<i>EUA</i>	<i>EC_i</i>
Água (W)	3	92,856*	0,0118**	642 ^{ns}	1,8038**	0,4498 ^{ns}	0,00039 ^{ns}
Estádio (E)	3	176,885**	0,0210**	32735**	2,9957**	16,5276**	0,05083**
W x E	9	53,990**	0,0040**	521 ^{ns}	0,7477**	0,2034 ^{ns}	0,00368 ^{ns}
C.V. 1 (%)		11,55	15,71	27,67	8,50	8,57	11,31
C.V. 2 (%)		11,78	13,77	33,80	10,90	9,52	15,79

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

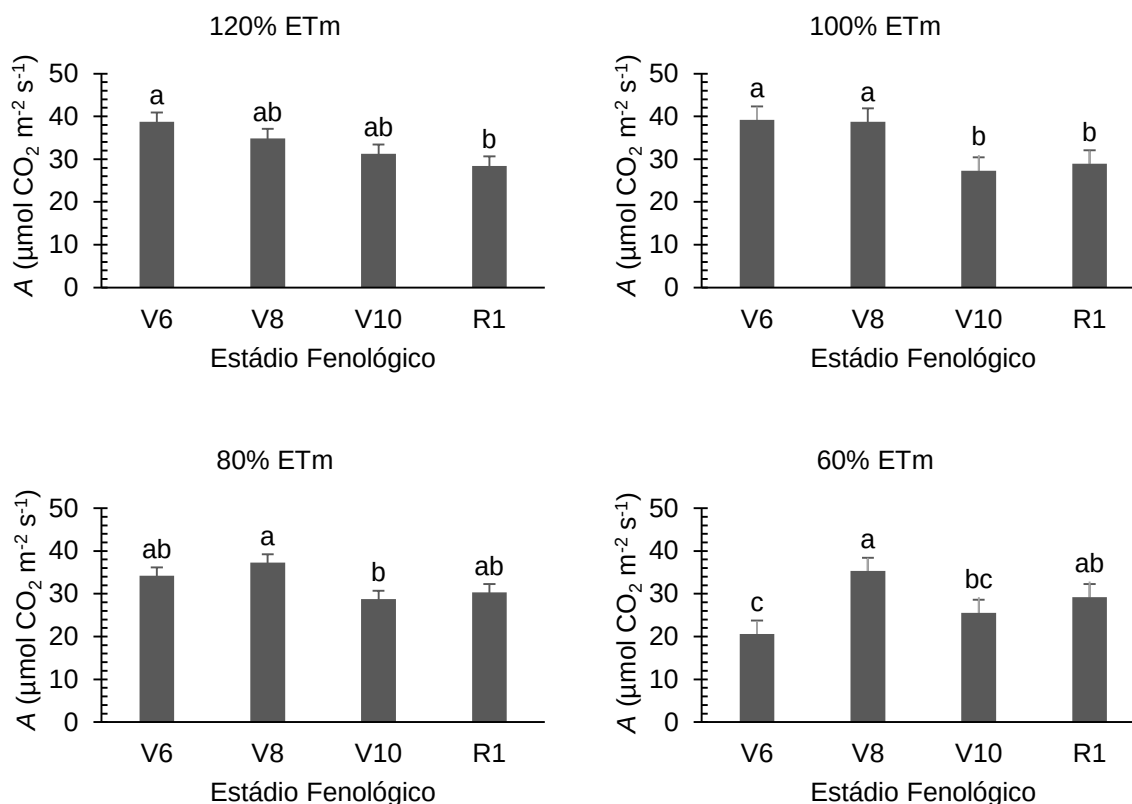
*, ** - significativo a 5% e 1%, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

O valor médio da *A* foi superior no estágio fenológico V6 em comparação ao valor observado no estágio fenológico R1 sob suprimento de água no solo de 120% da ET_m (Figura 87). Sob status de água no solo de 100% da ET_m, os valores de *A* nos estádios fenológicos V6 e V8 foram maiores do que aqueles determinados nos estádios fenológicos V10 e R1. O valor médio da *A* encontrado sob nível de umidade do solo correspondente a 80% da ET_m em V8 foi superior ao valor mensurado no estágio V10. Sob 60% da ET_m, o valor de *A* observado no estágio V8 foi maior em relação aos valores referentes aos estádios fenológicos V6 e V10; ainda, o valor médio de *A* medido em R1 foi superior ao encontrado em V6.

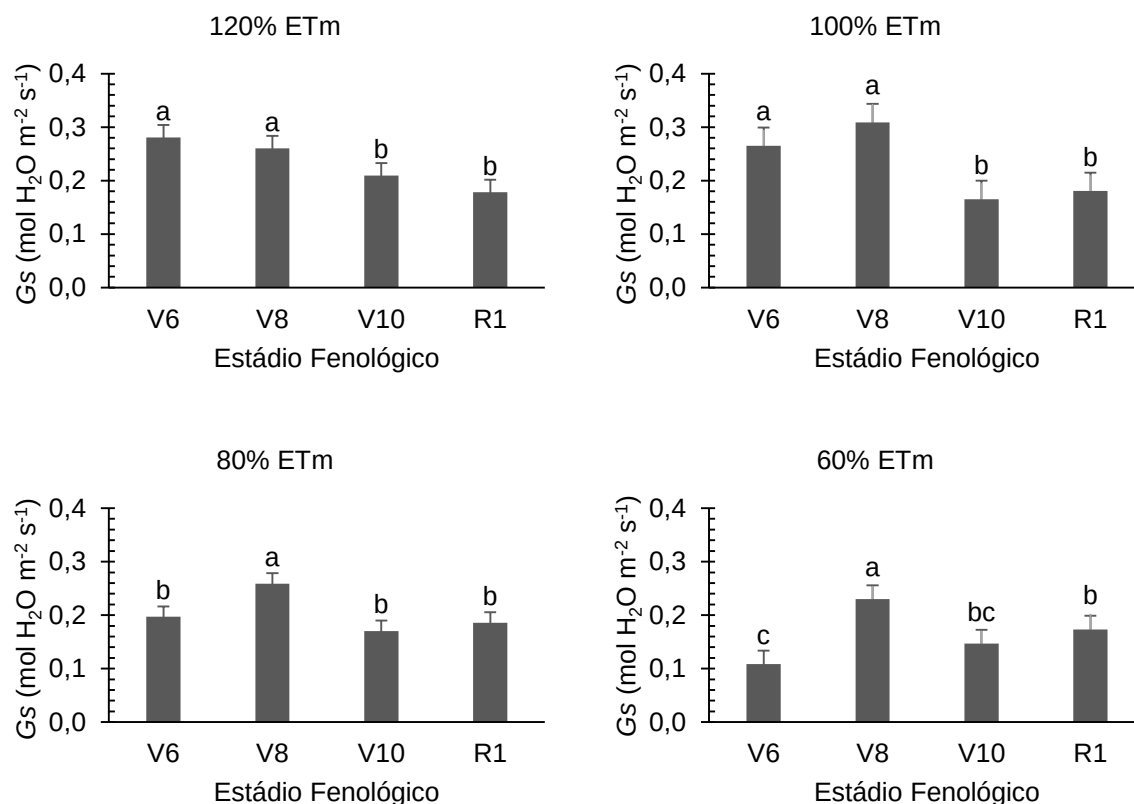
Figura 87 – Fotossíntese líquida de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P < 0,05$).



Fonte: O autor

Os fatores suprimento de água no solo e estágio fenológico influenciaram significativamente a Gs das plantas de milho sob condição de ambiente protegido (Tabela 21). Essa variável fisiológica também foi influenciada significativamente pela interação entre os tratamentos. Sob os regimes de 120% e 100% da ETm, os valores médios da Gs aferidos em V6 e V8 foram superiores aos valores observados em V10 e R1 (Figura 88). Sob 80% da ETm, o valor médio da Gs no estágio V8 foi superior em comparação aos demais estádios fenológicos. Sob 60% da ETm, o valor médio da Gs foi maior em V8, seguido pelo estágio R1 e, depois, pelos estádios V10 e V6.

Figura 88 – Condutância estomática de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P < 0,05$).

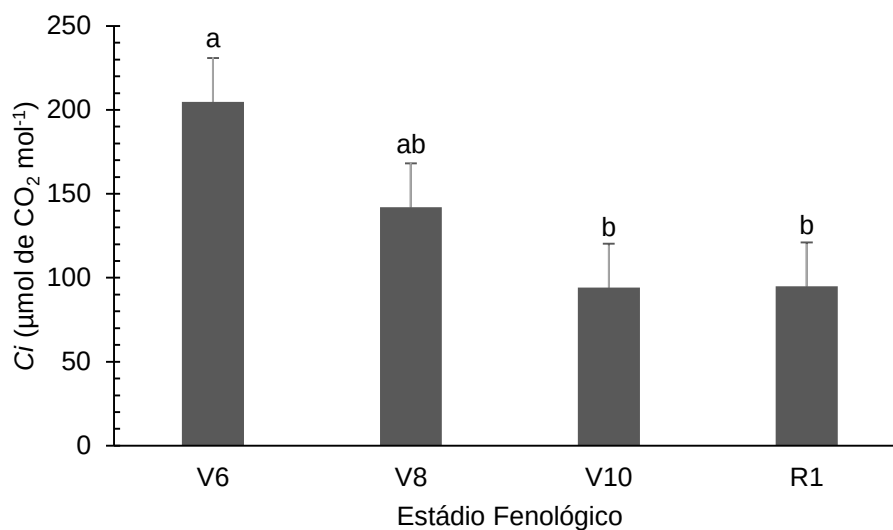


Fonte: O autor

A *Ci* das plantas de milho foi influenciada significativamente somente pelo estágio fenológico (Tabela 21). A avaliação realizada no estágio fenológico V6 da cultura do milho apresentou *Ci* significativamente maior em relação às medidas aferidas nos estádios fenológicos V10 e R1, independentemente dos regimes hídricos adotados (Figura 89).

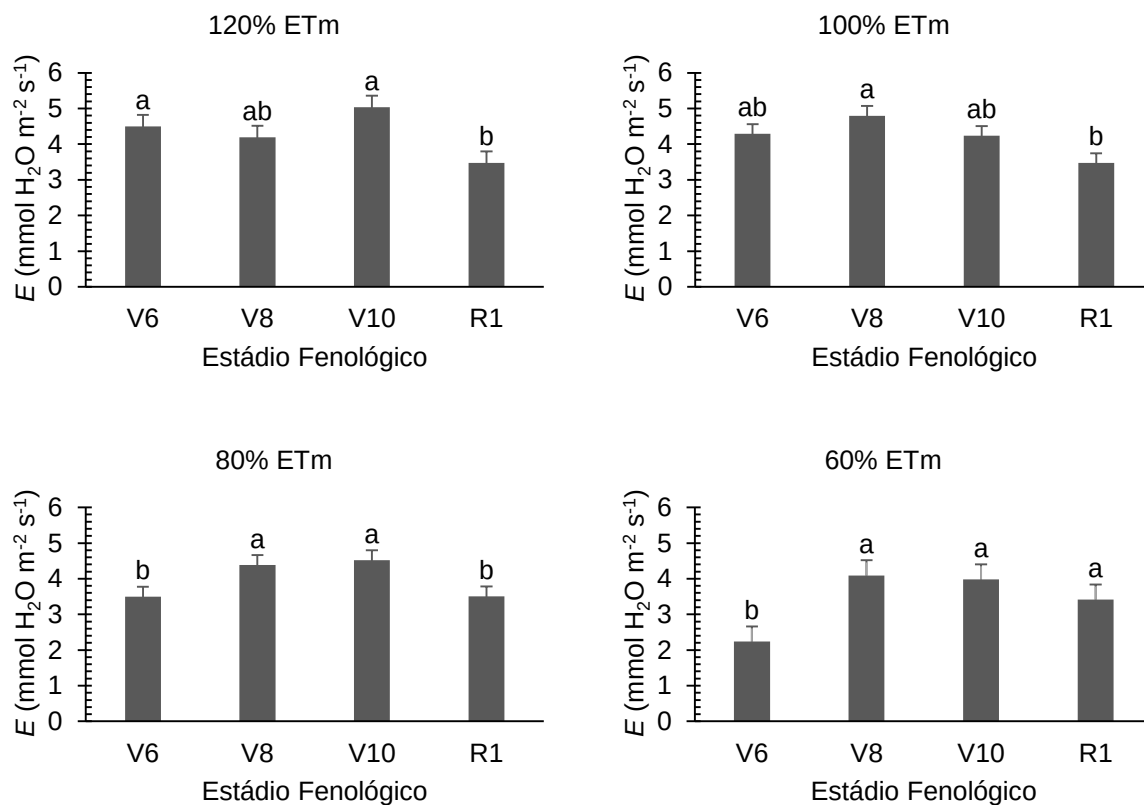
A *E* do milho foi afetada significativamente pelo suprimento de água no solo, pelo estágio fenológico e pela interação entre os tratamentos (Tabela 21). Sob status de água no solo de 120% da ETm, os valores médios da *E* determinados nos estádios fenológicos V6 e V10 foram maiores em comparação ao valor médio da *E* medido em R1 (Figura 90). Sob nível de água no solo correspondente a 100% da ETm, a *E* encontrada em V8 foi maior do que a *E* obtida em R1. Sob 80% da ETm, os valores de *E* obtidos nos estádios V8 e V10 foram maiores em comparação aos valores aferidos nos estádios fenológicos V6 e R1. Sob 60% da ETm, os valores de *E* determinados em V8, V10 e R1 foram maiores que o encontrado em V6.

Figura 89 – Concentração de carbono intercelular de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).



Fonte: O autor

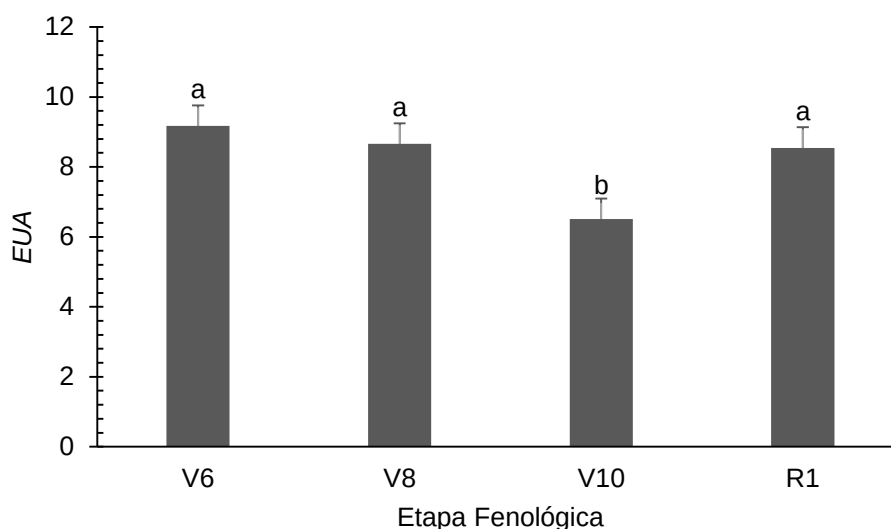
Figura 90 – Transpiração foliar de milho em função de diferentes estádios fenológicos para cada nível de água no solo, sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P<0,05$).



Fonte: O autor

A *EUA* das plantas de milho foi influenciada significativamente somente pelo estágio fenológico (Tabela 21). A *EUA* determinada nos estádios V6, V8 e R1 foi significativamente maior que a obtida em V10, independentemente do suprimento de água no solo (Figura 91).

Figura 91 – Eficiência fotossintética do uso da água de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P < 0,05$).



Fonte: O autor

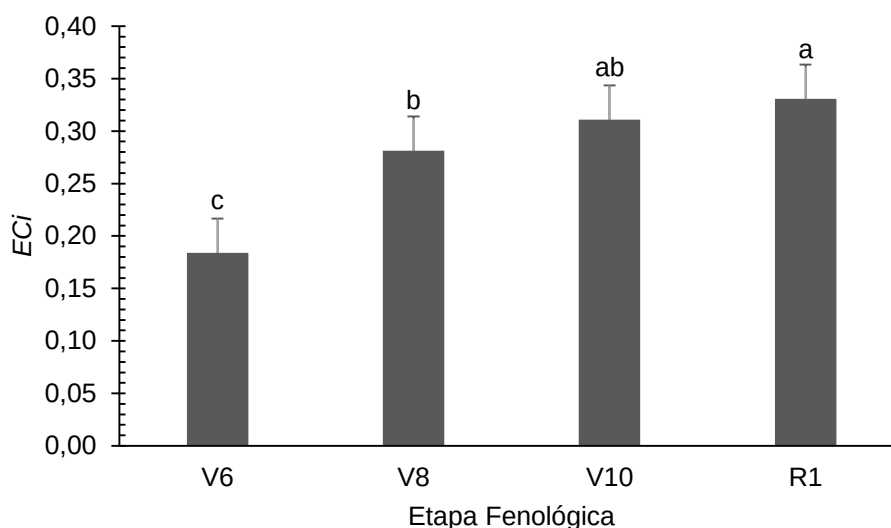
A *ECi* das plantas de milho também foi condicionada somente pelos estádios fenológicos (Tabela 21). O valor médio da *ECi* em R1 foi significativamente maior em comparação aos valores observados em V8 e V6; ainda, a *ECi* em V8 foi maior que em V6 (Figura 92).

Para todas as variáveis fisiológicas observou-se efeito significativo dos estádios fenológicos da cultura do milho. Esse resultado indica que a resposta fisiológica do milho variou conforme a época de avaliação. Considerando os estádios fenológicos, o desempenho da *A*, da *Gs* e da *E* foi semelhante, demonstrando alto grau de associação entre essas três variáveis fisiológicas.

A correlação entre a assimilação de CO_2 e a condutância estomática pode ser explicada como uma função da alta concentração de CO_2 no sítio de carboxilação quando ocorre o aumento da condutância estomática (Campostrine; Yamanishi, 2001). Barboza e Teixeira Filho (2017) analisando o comportamento da *E* e da *Gs* em cana de açúcar em função da radiação fotossinteticamente ativa e do déficit de

pressão de vapor sob diferentes potenciais hídricos das plantas observaram que a E acompanhou a G_s em várias situações, verificando uma similaridade entre essas duas variáveis fisiológicas em todas as plantas.

Figura 92 – Eficiência de carboxilação de milho em função de diferentes estádios fenológicos sob condições climáticas de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. Letras diferentes para etapa fenológica diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($P < 0,05$).



Fonte: O autor

5.3.7 Teor de clorofila

Os teores de clorofila A e clorofila B não foram afetados pelo status de água e pelo balanço catiônico no solo, nas quatro épocas de avaliação (Tabela 22). Efeito de interação entre os dois fatores também não foi detectado. Os valores médios de clorofila A foram de 27,0; 31,5; 29,6 e 28,8 aos 37, 48, 58 e 69 DAE, respectivamente. Com relação a clorofila B, os valores médios foram de 10,1; 11,8; 10,2 e 9,5 aos 37, 48, 58 e 69 DAE, respectivamente.

Nas linhagens de milho avaliadas por Magalhães *et al.* (2009), as plantas conduzidas sem déficit hídrico apresentaram teor de clorofila superior em comparação as plantas submetidas a déficit hídrico. Os valores médios do teor de clorofila total foram de 42,36 e 35,32 para plantas de milho conduzidas sob irrigação plena e estresse hídrico, respectivamente.

Tabela 22 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para teores de clorofila A e clorofila B determinados através do clorofilômetro portátil na cultura do milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		36 DAE		53 DAE	
		Clorofila A	Clorofila B	Clorofila A	Clorofila B
Água (W)	3	2,1700 ^{ns}	4,2023 ^{ns}	4,7227 ^{ns}	3,3790 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	1,2233 ^{ns}	2,2597 ^{ns}	3,6077 ^{ns}	4,6070 ^{ns}
W x R	9	8,4589 ^{ns}	2,0163 ^{ns}	3,1157 ^{ns}	1,5024 ^{ns}
C.V. (%)		10,32	17,51	6,16	11,71

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		63 DAE		70 DAE	
		Clorofila A	Clorofila B	Clorofila A	Clorofila B
Água (W)	3	1,3080 ^{ns}	1,8857 ^{ns}	6,9580 ^{ns}	1,9343 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	1,4747 ^{ns}	1,4743 ^{ns}	3,2327 ^{ns}	0,5150 ^{ns}
W x R	9	3,0610 ^{ns}	0,9164 ^{ns}	3,2811 ^{ns}	0,5359 ^{ns}
C.V. (%)		5,05	12,59	5,63	9,37

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

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

5.3.8 Atributos químicos do solo

O status de água no solo não afetou significativamente os teores de Ca trocável no solo após o cultivo de milho (Tabela 23). Porém, a concentração do referido nutriente foi influenciada pelo balanço catiônico no solo. Os teores de Ca trocável no solo foram descritos por um modelo de regressão quadrático, com valores máximo e mínimo de 4,07 e 2,74 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ sob as proporções Ca:Mg 9:1 e 1:1, respectivamente (Figura 93). Esses resultados são semelhantes aos obtidos com os cultivos de soja e cevada, em que os teores de Ca trocável aumentaram em função do incremento de CaCO_3 e da redução do MgCO_3 incorporados no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

Medeiros *et al.* (2008) detectaram uma variação quadrática nos teores de Ca trocável em função do balanço de cátions no solo cultivado com milho em ambiente protegido durante 45 dias. As relações Ca:Mg utilizadas no experimento foram de 1:1, 2:1, 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1, com teores de Ca trocável variando de 6,2 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ sob a menor proporção Ca:Mg a 24,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ sob maior proporção Ca:Mg. Com o intuito de investigar o efeito das relações Ca:Mg no solo de 0,5:1; 1:1; 2:1; 4:1 e 8:1 sobre o desempenho agrônomo do milho em ambiente protegido, Luciano Junior (2018)

identificou aumento linear dos teores médios de Ca trocável mediante incremento da relação Ca:Mg dos corretivos. Nas amostras de solo coletadas após o cultivo do milho, os teores de Ca trocável máximo e mínimo foram de 11,7 e 7,6 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob as razões molares de 8:1 e 0,5:1, respectivamente.

Tabela 23 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para teores de Ca, Mg e K no solo após a colheita da parte aérea do milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Ca trocável	Mg trocável	K trocável
Água (W)	3	0,0587 ^{ns}	0,0022 ^{ns}	0,00046 ^{**}
Ca:Mg (R)	3	4,4352 ^{**}	10,7066 ^{**}	0,00017 [*]
W x R	9	0,0220 ^{ns}	0,0256 ^{ns}	0,00007 ^{ns}
C.V. (%)		6,35	17,15	15,92

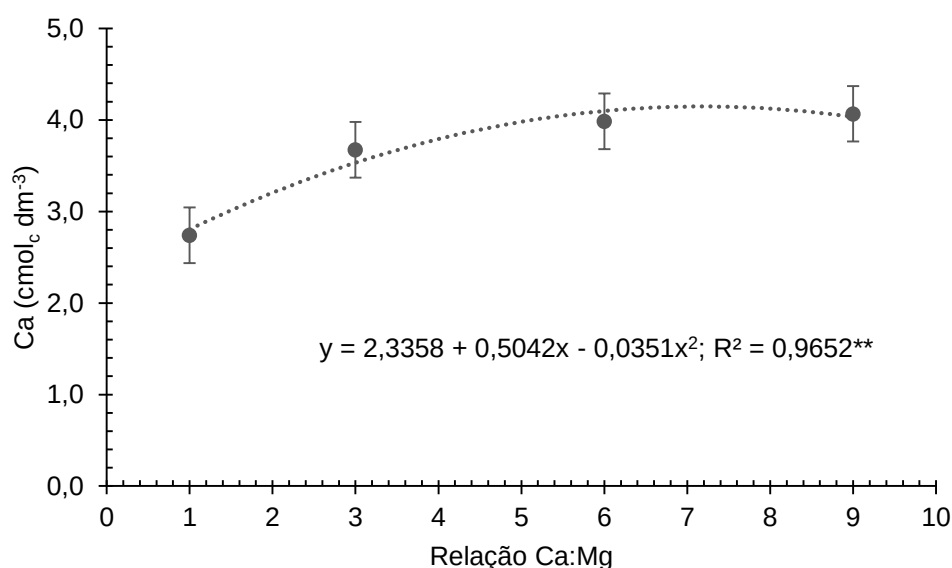
^{ns} - não significativo.

^{*}, ^{**} - significativo a 5% e 1%, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

Figura 93 – Teores de Ca trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.

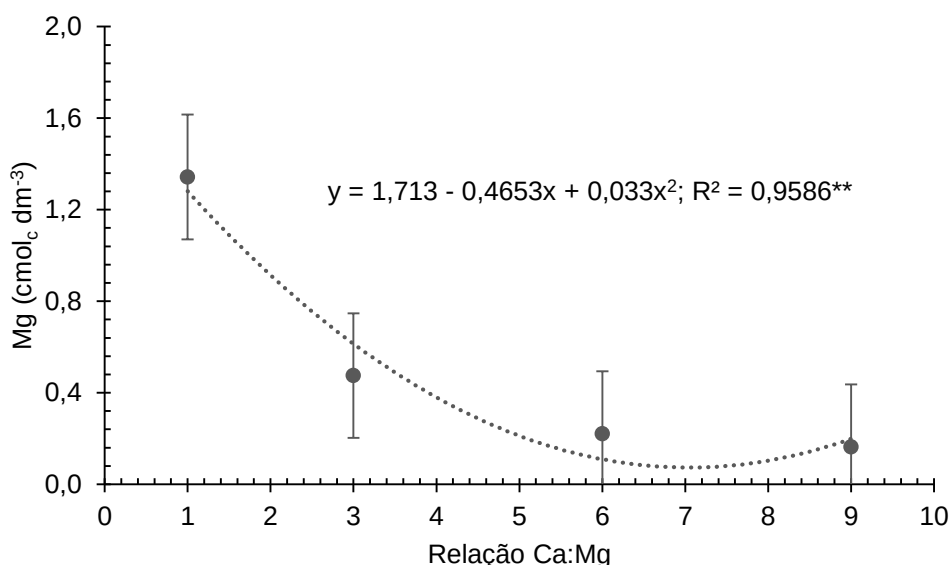


Fonte: O autor

Os teores de Mg trocável do solo não foram influenciados pelo suprimento hídrico do solo. No entanto, o balanço de cátions afetou a concentração do referido nutriente no solo (Tabela 23). Um modelo de regressão quadrático descreveu os teores de Mg trocável no solo sob as relações Ca:Mg (Figura 94). Os valores médios dos teores de Mg trocável variaram de 0,16 a 1,34 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sob as relações Ca:Mg

9:1 e 1:1, respectivamente (Figura 94). A redução de Mg trocável observada após o cultivo do milho se deu em proporção semelhante ao aumento de Ca trocável no solo em virtude do incremento de CaCO_3 em detrimento do MgCO_3 incorporados no solo com o aumento da relação Ca:Mg.

Figura 94 – Teores de Mg trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



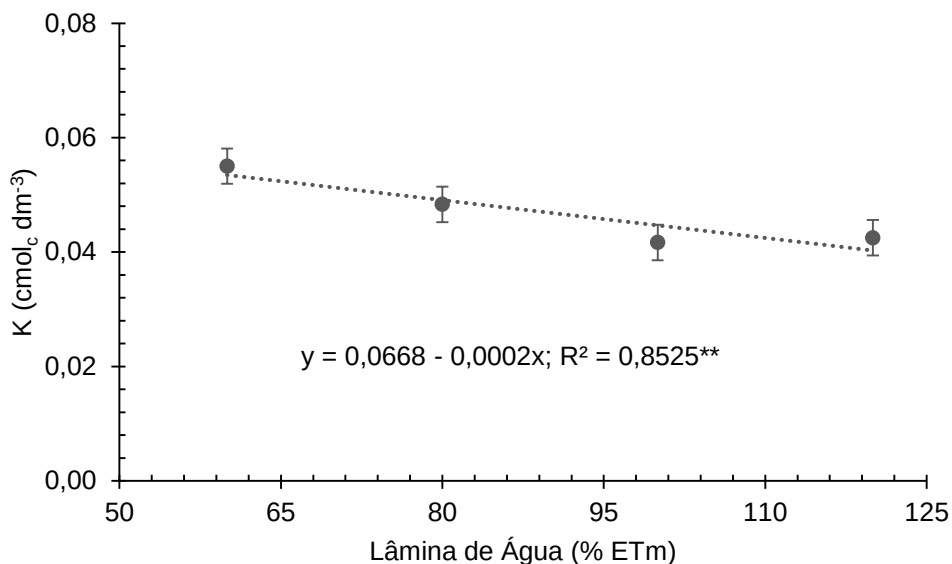
Fonte: O autor

No cultivo de milho em ambiente protegido, Medeiros *et al.* (2008) verificaram que os teores de Mg trocável no solo reduziam com o aumento das relações Ca:Mg. Os valores máximo e mínimo obtidos pelos referidos autores foram de 5,7 e 0,8 cmol_c dm⁻³ sob as relações Ca:Mg 1:1 e 32:1, respectivamente. Luciano Junior (2018) constataram que os teores médios de Mg trocável reduziram linearmente em função do balanço catiônico no solo após o cultivo de milho em ambiente protegido. Os valores encontrados pelo referido autor oscilaram de 3,40 a 8,30 cmol_c dm⁻³ sob as relações Ca:Mg de 8:1 e 0,5:1, respectivamente.

No que tange aos teores de K trocável no solo, a referida variável-resposta foi influenciada significativamente pelos níveis de água aplicados no solo e pelas relações Ca:Mg no solo (Tabela 23). Efeito de interação entre os dois fatores não foi observado. Os teores de K trocável reduziram linearmente com o incremento do suprimento hídrico do solo, com valores fluando de 0,043 a 0,055 cmol_c dm⁻³ sob os níveis de umidade de 120% e 60% da ET_m, respectivamente (Figura 95). Com relação ao balanço catiônico no solo, o teor de K trocável foi descrito por um modelo de

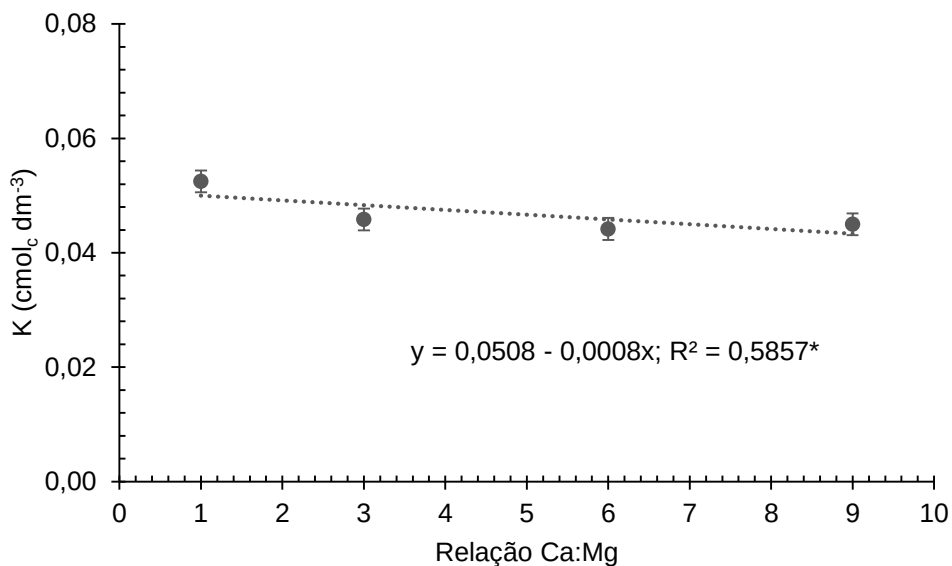
regressão linear, com valores máximo e mínimo de 0,053 e 0,045 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ sob as relações Ca:Mg 1:1 e 9:1, respectivamente (Figura 96).

Figura 95 – Teores de K trocável no solo após o cultivo do milho em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Figura 96 – Teores de K trocável no solo após o cultivo do milho em função das relações Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

5.3.9 Atributos químicos da parte aérea

A absorção de Ca pelas plantas de milho foi significativamente governada pelos tratamentos de água, pelas relações Ca:Mg do solo e pela interação entre os tratamentos (Tabela 24). Sob as relações Ca:Mg do solo 1:1, 3:1 e 6:1, a extração de Ca pelas plantas foi afetada em função da disponibilidade hídrica (Figura 97). Na relação Ca:Mg 1:1, a extração de Ca aumentou linearmente mediante incremento dos níveis de umidade do solo, com valores médios oscilando de 0,19 a 0,65 g planta⁻¹ sob 60% e 120% da ETm, respectivamente. Um aumento linear da absorção de Ca pelas plantas em função da disponibilidade hídrica do solo foi observado também na relação Ca:Mg 3:1, com valores médios variando de 0,37 a 0,74 g planta⁻¹ mediante aplicação de lâminas de água correspondentes a 60% e 120% da ETm, respectivamente. Um modelo de regressão quadrático explicou a influência do efeito do suprimento hídrico do solo sobre a absorção de Ca nas plantas para a relação Ca:Mg 6:1, com valores extremos de 0,93 e 0,42 g planta⁻¹ sob 80% e 60% da ETm, respectivamente. A extração de Ca pelas plantas na relação Ca:Mg 9:1 não foi influenciada significativamente pelo suprimento de água no solo.

Tabela 24 – Resumo da análise de variância com aplicação do teste *F* para extração de Ca, Mg e K pelas plantas de milho sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios		
		Extração de Ca	Extração de Mg	Extração de K
Água (W)	3	0,14586**	0,06411**	0,74350 ^{ns}
Ca:Mg (R)	3	0,21238**	0,00937 ^{ns}	0,14127 ^{ns}
W x R	9	0,07930**	0,01362 ^{ns}	0,22174 ^{ns}
C.V. (%)		24,99	29,58	8,68

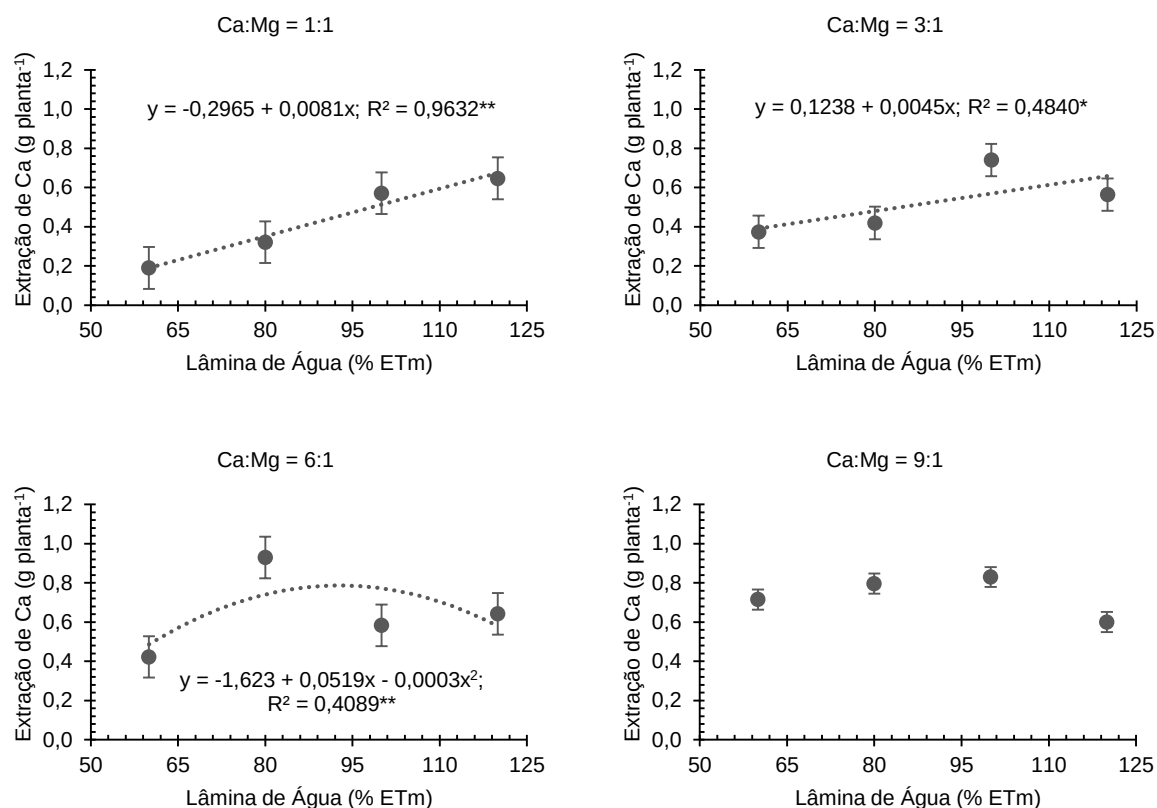
^{ns} - não significativo.

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

C.V. – coeficiente de variação.

Fonte: O autor

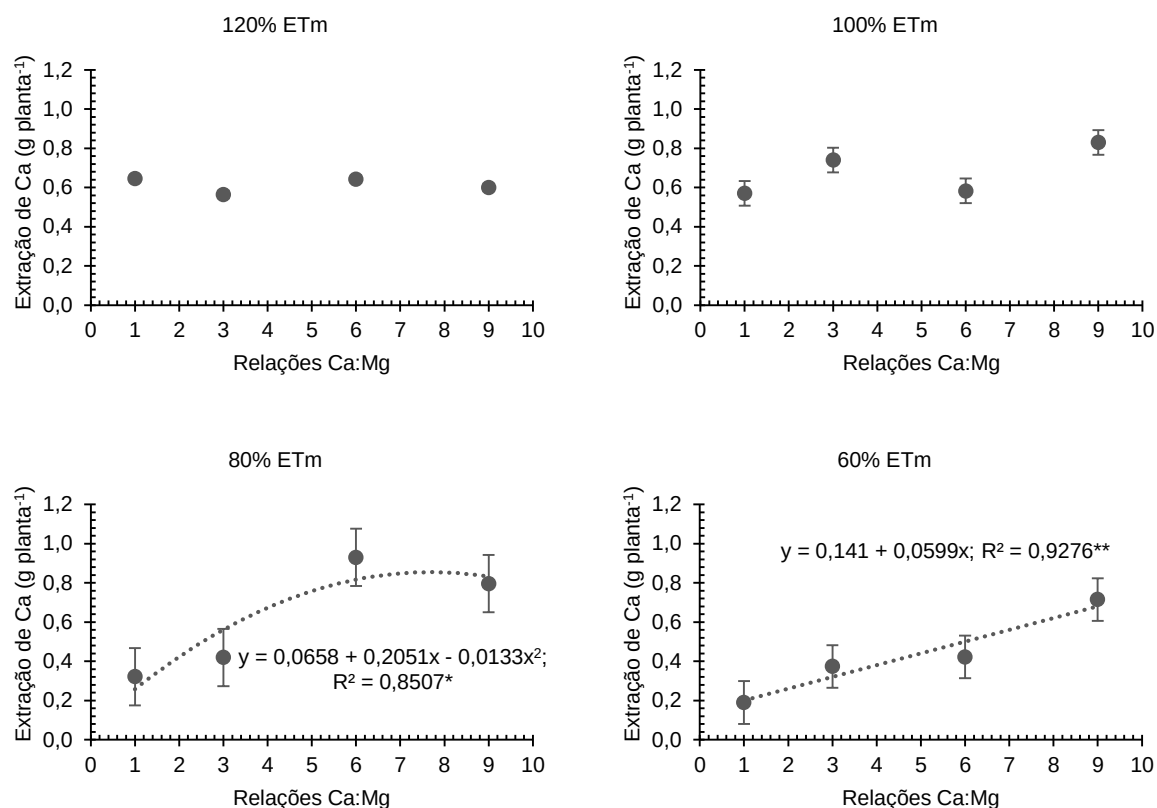
Figura 97 – Extração de Ca pelas plantas de milho em função dos níveis de água no solo para cada relação Ca:Mg sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Sob os níveis de água no solo de 80% e 60% da ETm, nota-se que a extração de Ca pelas plantas de milho foi influenciada pelo balanço catiônico (Figura 98). Sob 80% da ETm, a absorção de Ca pelas plantas foi descrita por um modelo de regressão quadrático em função das relações Ca:Mg do solo, com valores máximo e mínimo de 0,93 e 0,32 g planta⁻¹ em função das relações Ca:Mg 6:1 e 1:1, respectivamente. Sob 60% da ETm, a extração de Ca pelas plantas aumentou linearmente com o incremento da disponibilidade hídrica do solo, com valores oscilando de 0,19 a 0,72 g planta⁻¹ sob relações Ca:Mg 1:1 e 9:1, respectivamente. Sob os níveis de água no solo de 120% e 100% da ETm, a absorção de Ca pelas plantas de milho não foi alterada significativamente pela relação Ca:Mg no solo.

Figura 98 – Extração de Ca pelas plantas de milho em função de diferentes relações Ca:Mg no solo para cada nível de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$ e **: $P < 0,01$.



Fonte: O autor

Com a finalidade de analisar a absorção de nutrientes pelas plantas de milho em função do estresse hídrico e do nível de K no solo, Ferreira e Büll (1997) aplicaram três doses de K (0, 90 e 180 mg dm³) e três condições de estresse hídrico (sem estresse, estresse hídrico aos 48 DAE e estresse hídrico aos 48 e 73 DAE). Os referidos autores observaram que os tratamentos de água não afetaram a absorção de Ca pelas plantas. No cultivo de sorgo em condições de ambiente protegido, Leão, Freire e Miranda (2011) não constataram influência do estresse hídrico sobre a absorção de Ca pelas plantas. Os tratamentos referentes ao status de água no solo foram aplicados 45 DAE separando-se as plantas em dois grupos: o primeiro normalmente irrigado e o outro com a irrigação suspensa até a colheita da parte aérea (60 DAE). O acúmulo de Ca foi de 0,084 mg planta⁻¹ sob regime hídrico sem estresse e 0,082 mg planta⁻¹ sob regime hídrico com estresse.

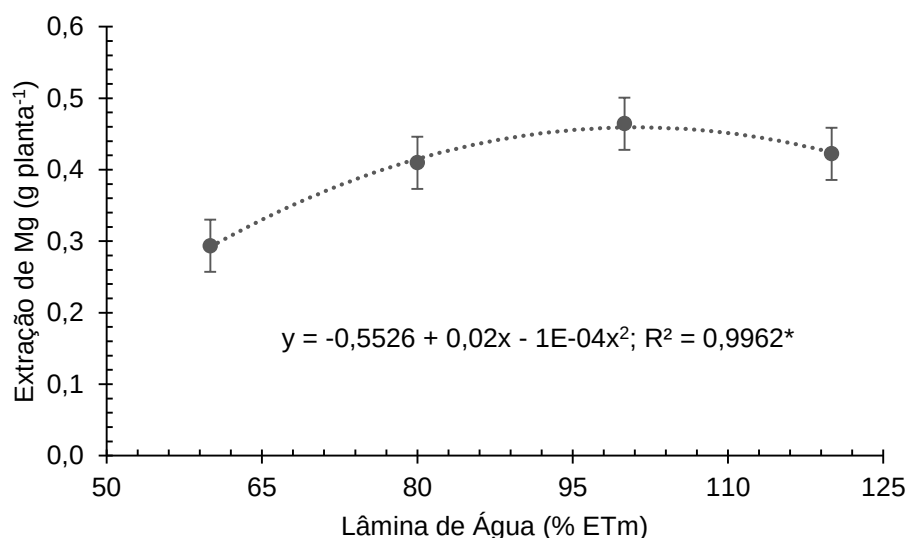
A concentração de Ca da parte aérea de plantas de milho cultivadas em casa de vegetação por Medeiros *et al.* (2008) foi descrita por um modelo de regressão quadrático. As relações Ca:Mg do corretivo utilizado pelos referidos autores foram de

1:1, 2:1, 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1. Os teores de Ca na parte aérea do milho variaram de 1,2 a 3,2 g Kg⁻¹ sob razões molares de 1:1 e 32:1, respectivamente. Num experimento em casa de vegetação com a cultura do milho, Arantes (1983) avaliou o efeito de dois níveis de corretivo (40% e 60% da saturação por bases), quatro relações Ca:Mg (2:1, 5:1, 15:1 e 45:1) e quatro níveis de adubação potássica (0, 55, 110 e 220 mg dm⁻³) sobre a absorção de Ca pelas plantas. A concentração de Ca na matéria seca das plantas de milho aumentou com o incremento da relação Ca:Mg do corretivo em todos os níveis de adubação potássica aplicada.

A absorção de Mg pelas plantas de milho não foi afetada pelo balanço catiônico no solo (Tabela 24) e o comportamento do referido nutriente foi descrito por um modelo de regressão quadrático tendo com variável preditora o status de água no solo (Figura 99). A extração de Mg pelas plantas oscilou de 0,29 a 0,46 g planta⁻¹ sob os níveis de água no solo de 60% e 100% da ETm, respectivamente.

A absorção de Mg pelas plantas de milho conduzidas por Ferreira e Büll (1997) não foi condicionada pelos tratamentos de água. O acúmulo de Mg determinado por Leão, Freire e Miranda (2011) em plantas de sorgo não foi influenciada pela disponibilidade hídrica. O valor referente a extração de Mg pelas plantas foi de 0,012 mg planta⁻¹ para ambos tratamentos com e sem estresse hídrico.

Figura 99 – Extração de Mg pelas plantas de milho em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido. Ponta Grossa – PR, 2024. *: $P < 0,05$.



Fonte: O autor

O teor de Mg do tecido vegetal de plantas de milho a partir de um experimento conduzido por Medeiros *et al.* (2008) em função do balanço de cátions foi descrito por

um modelo de regressão quadrático. O valor máximo de concentração de Mg absorvido pelas plantas foi de $2,2 \text{ g kg}^{-1}$ sob razão molar de 1:1, ao passo que seu valor mínimo foi de $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ sob razões molares de 16:1 e 32:1. Arantes (1983) observou que a concentração de Mg na matéria seca de milho reduziu em função do aumento das relações Ca:Mg do solo para cada nível de adubação potássica.

Para a absorção de K pelas plantas de milho não se detectou influência dos fatores níveis de água no solo e da relação Ca:Mg no solo sobre a referida variável-resposta (Tabela 24). Um valor médio de $6,56 \text{ g planta}^{-1}$ foi obtido para extração de K pelas plantas de milho conduzidas em ambiente protegido.

No milho conduzido por Ferreira e Büll (1997), os diferentes regimes hídricos influenciaram a extração K pelas plantas com aplicação da dose correspondente a 90 mg dm^3 , de forma que a irrigação constante resultou numa maior concentração de K nas folhas. Nas doses de 0 e 180 mg dm^3 , o status de água no solo não afetou a absorção de K pelas plantas. Efeito do manejo de água sobre a absorção de K pelas plantas de sorgo foi reportado por Leão, Freire e Miranda (2011) sob condições de ambiente protegido. A extração de K pelas plantas foi de $1,230 \text{ mg planta}^{-1}$ sob regime hídrico sem estresse e $0,620 \text{ mg planta}^{-1}$ sob tratamento com estresse hídrico.

Medeiros *et al.* (2008) observaram que a concentração de K na parte aérea das plantas de milho reduziu linearmente com o incremento da relação Ca:Mg no solo. Os teores máximo e mínimo de K foram de 33 e 25 g kg^{-1} sob as proporções Ca:Mg do solo de 1:1 e 32:1, respectivamente. O teor de K na matéria seca de plantas de milho conduzidas por Arantes (1983) não foi influenciado pelo balanço catiônico no solo. As concentrações de K na parte aérea de milho oscilaram de 28,65 a $30,88 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ sob relações Ca:Mg 5:1 e 2:1, respectivamente.

A disponibilidade de nutrientes para as plantas desempenha papel fundamental para garantir a melhor resposta agrícola em campos de produção em função do status de água no solo (Leão; Freire; Miranda, 2011). O suprimento hídrico do solo é um meio de transferência de elementos químicos, nutrientes e outras substâncias do solo para as raízes (Raij, 2011). De acordo com Barber (1974), o déficit hídrico rigoroso diminui ou inibe a absorção de nutrientes pelas plantas, pois a água é veículo pelo qual os íons se movimentam da solução do solo para o sistema radicular das plantas, principalmente se o movimento ocorre por fluxo de massa ou por difusão. Assim, além de afetar a produtividade, a deficiência hídrica governa os níveis de rendimento das

culturas agrícolas por interferir diretamente na disponibilidade e no transporte de nutrientes da solução do solo para a rizosfera (Clair; Lynch, 2010).

Para minimizar os efeitos prejudiciais das discrepâncias nas relações entre Ca e Mg, as plantas tendem a compensar o desbalanço do solo ou, ainda, a alta concentração de Ca que chega até as raízes, provocando a saturação dos carregadores na membrana e impedindo sua absorção nas mesmas proporções existentes no solo (Medeiros *et al.*, 2008). Segundo Holzschuh (2007), ocorre um controle na entrada de Ca e Mg pela membrana plasmática e a manutenção das concentrações destes elementos na célula.

6 CONCLUSÕES

O status de água no solo condicionou a extração de Ca pelas plantas de soja, cevada e milho. Sob relação Ca:Mg 1:1, a absorção de Ca pelas plantas do cultivar de soja IAC Foscarin-31 aumentou em função dos níveis de água no solo segundo um modelo de regressão quadrático, ao passo que sob as relações Ca:Mg 3:1 e 9:1 o aumento da absorção de Ca foi explicado por um modelo de regressão linear simples. A extração de Ca pelas plantas do cultivar de soja BMX Zeus IPRO e da cultura da cevada aumentou linearmente sob o incremento dos regimes hídricos do solo. No milho, a absorção de Ca pelas plantas correlacionou-se positivamente com o suprimento de água no solo sob balanço de cátions 1:1 e 3:1. Sob relação Ca:Mg 6:1, a extração de Ca foi descrita por um modelo de regressão quadrático em função da disponibilidade hídrica do solo.

O balanço catiônico no solo não afetou a extração de Ca pelas plantas de soja e cevada. No milho, a absorção de Ca pelas plantas em função das razões molares entre Ca e Mg aumentou linearmente sob 60% da ETm, enquanto que o incremento da extração de Ca pelas plantas foi explicado por um modelo de regressão quadrático sob 80% da ETm. A extração de Mg pelas plantas de soja, cevada e milho não foi condicionada pelas relações Ca:Mg no solo.

Os regimes hídricos no solo influenciaram a absorção de Mg pelas plantas de soja, cevada e milho. A extração de Mg pelas plantas de soja em função do status de água no solo aumentou segundo um modelo de regressão linear simples, ao passo que no milho, o incremento da absorção de Mg sob os níveis de umidade do solo foi descrito por um modelo de regressão quadrático. Na cultura da cevada, a extração de Mg pelas plantas aumentou linearmente em função da disponibilidade hídrica do solo sob as relações Ca:Mg 3:1, 6:1 e 9:1.

Sob a relação Ca:Mg 1:1, o aumento da absorção de K pelas plantas do cultivar de soja IAC Foscarin-31 foi descrito por um modelo de regressão quadrático, ao passo que sob as relações Ca:Mg 3:1 e 9:1 o incremento da absorção do referido nutriente pelas plantas foi expresso por um modelo de regressão linear simples em função do status de água no solo. No cultivar BMX Zeus IPRO de soja e na cultura da cevada, a extração de K apresentou incremento linear sob os níveis de água no solo. A absorção de K pelas plantas de milho não foi condicionada pelo suprimento de água no solo.

O balanço Ca:Mg no solo não afetou a extração de K pelas plantas de soja, cultivar BMX Zeus IPRO, e de cevada. No cultivar IAC Foscarin-31 de soja, a extração de K pelas plantas reduziu linearmente em função das proporções Ca:Mg sob regime hídrico de 100% da ETm.

A concentração de K trocável no solo após cultivo de milho foi inferior em comparação ao teor de K sob o cultivo de soja. Essa resposta diferencial está relacionada a CTC radicular de gramíneas ser menor do que a CTC radicular de leguminosas, o que proporciona maior absorção de cátions monovalentes pelas raízes das plantas de milho.

O desempenho fitotécnico das culturas de soja, cevada e milho foi governado pelo suprimento de água no solo. A altura de plantas, o número de vagens por planta, o número de grãos por planta e a massa de grãos por planta de soja correlacionaram-se positivamente com o status de água no solo. Na cultura da cevada, o número de perfilhos, o número de espiga por planta, o número de grãos por planta, a massa de grãos por planta e a massa de mil grãos sofreram incremento linear em função da umidade do solo. O aumento da altura de plantas e das massas fresca e seca da parte aérea do milho foi descrito por um modelo de regressão quadrático, ao passo que o incremento na porcentagem de massa seca de parte aérea e da massa seca de raiz foi descrito por um modelo de regressão linear simples. A massa de mil grãos e a altura de inserção de primeira vagem dos cultivares de soja IAC Foscarin-31 e BMX Zeus IPRO não foram influenciadas pelos níveis de água. O genótipo de soja influenciou o desempenho fitotécnico da cultura em função dos níveis de umidade no solo e das relações Ca:Mg no solo. O cultivar BMX Zeus IPRO melhor se adaptou às condições locais em ambiente protegido do que o cultivar IAC Foscarin-31.

As respostas fisiológicas do milho foram governadas por estágio fenológico da cultura e status de água no solo. Detectou-se efeito de interação entre status de água no solo e estágio de desenvolvimento das plantas sobre as variáveis: fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração. A fotossíntese líquida, a condutância estomática e a transpiração medidas em V6 foram superiores a R1 sob 120% da ETm. Sob 100% da ETm, a fotossíntese líquida e a condutância estomática em V6 e V8 foram superiores a V10 e R1, ao passo que a transpiração em V8 foi significativamente mais elevada do que aquela observada em R1. Esta diferença de comportamento fisiológico do milho sob suprimento acima do ideal (120% da ETm) e correspondente ao ideal de água no solo (100% da ETm) pode ser atribuída a atividade funcional das

raízes acondicionadas em vaso sob ambiente protegido entre estádios fenológicos. A respiração do sistema radicular deve ter sido superior em R1 de modo a promover redução nas taxas de transpiração vegetal e de fotossíntese líquida sob tais condições hídricas do solo.

O balanço catiônico no solo não exerceu influência sobre estado nutricional das plantas de soja, cevada e milho, independentemente das condições hídricas do solo, embora a CTC radicular interfira na eficiência agrônômica de Ca e Mg.

Há a necessidade de proposição de futuras investigações científicas para maior compreensão dos mecanismos fisiológicos de plantas com CTC radicular distintas em função do tipo de metabolismo vegetal, os quais governam a dinâmica da água no sistema solo-planta e a eficiência agrônômica de Ca, Mg e K em campos de produção agrícola.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F.; HENDERSON, J. B. Magnesium availability as affected by deficient and adequate levels of potassium and lime. **Soil Science Society of America**, v. 26, n. 1, p. 65-68, 1962.
- AGEGNEHU, G.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. **Soil & Tillage Research**, v. 160, p. 1-13, 2016.
- ALMEIDA, A. C. S.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; BISCARO, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448-1457, 2017.
- ALMEIDA, A. M. **Crescimento da grama bermuda Discovery™ irrigada por gotejamento subsuperficial, sob tensões de água no solo**. 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação em Drenagem) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Botucatu, 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6; p. 711-728, 2013.
- AMINIFAR, J.; MOHSENABADI, G. H.; 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.
- ANJOS, F. A. dos, FERRAZ, R. L. de S., AZEVEDO, C. A. V. de, COSTA, P. da S., MELO, A. S. de, RAMALHO, V. R. R. de A. R. Relationship between physiology and production of maize under different water replacements in the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 21-27, 2022.
- ANJUM, S. A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M. F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological, and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, p. 2026-2032, 2011.
- ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; DALL’OLIO, A.; SALCEDO, I. H. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 29-34, 2000.
- ARANTES, E. M. **Efeitos da relação Ca/Mg do corretivo e níveis de potássio na produção de matéria seca, concentrações de K, Ca, Mg e equilíbrio catiônico do milho (*Zea mays* L.)**. 1983. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1983.

ARAÚJO, W. A. **Acúmulo de matéria seca e marcha de absorção de nutrientes em soja de crescimento determinado e indeterminado**. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Grande Dourados, Dourados, 2018.

ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K. M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1838-1846, 2010.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, v. 31, p. 1075-1084, 2001.

ASAWA, G. L. **Irrigation and Water Resources Engineering**. New Delhi: New age International Publishers, 2008. 608 p.

ASHER, C. J.; OZANNE, P. G. The cation exchange capacity of plant roots, and its relationship to the uptake of insoluble nutrients. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 12, p. 755-766, 1961.

BARBER, S. A. Influence of the plant root on ion movement in soil. *In*: CARSON, E. W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University of Virginia, 1974. p. 525-564.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John & Wiley, 1984. 398 p.

BARBOSA, J. R.; PEREIRA FILHO, J. V. P.; OLIVEIRA, V. M.; SOUSA, G. G.; GOES, G. F.; LEITE, K. N. Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4200-4210, 2020.

BARBOZA, G. C.; TEIXEIRA FILHO, J. Transpiração foliar e condutância estomática da cana-de-açúcar em função do clima e disponibilidade de água. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 675-689, 2017.

BELLIDO, L. L. **Cereales**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1991. 539 p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. p. 237-260.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual da precipitação e variabilidade dos rendimentos de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 119-125, 1999.

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.

BOARD, J. E. Yield components related to seed yield in determinate soybean. **Crop Science**, v. 27, p. 1296-1297, 1987.

BRAGA, M. B.; KLAR, A. E. Evaporação e evapotranspiração de referência em campo e estufa orientadas nos sentidos norte-sul e leste-oeste. **Irriga**, v. 5, n. 3, p. 188-193, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNPV/CLAV, 2009. 395 p.

BREVEDAN, R.; EGLI, D. B. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. **Crop Science**, v. 43, p. 2083-2088, 2003.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D. de; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S. de; COSTA, F. B. da; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1244-1254, 2013.

BRUNETTA, D.; BASSOI, M. C.; DOTTO, S. R.; SCHEEREN, P. L.; MIRANDA, M. Z.; TAVARES, L. C. V.; MIRANDA, L. C. Características e desempenho agrônomo da cultivar de trigo BRS 229 no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 889-892, 2006.

BÜLL, L. T.; VILLAS BÔAS, R. L.; NAKAGAWA J. Variações no balanço catiônico no solo induzidas pela adubação potássica e efeitos na cultura do alho vernalizado. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 456-464, 1998.

CAEIRÃO, E.; CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F. Cevada. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. p. 167-181.

CAMPOSTRINE, E.; YAMANISHI, O. K. Influence of mechanical root restriction gas exchange of four papaya genotypes. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 2, p. 129-138, 2001.

CANCELLIER, L. L., AFFÉRI, F. S., ADORIAN, G. C., RODRIGUES, H. V. M., MELO, A. V., PIRES, L. P. M., CANCELLIER, E. L. Adubação orgânica na linha de semeadura no desenvolvimento e produtividade do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 527-540, 2011.

CARRÃO-PANIZZI, M. C.; SILVA, B. S.; LEITE, R. S.; GODOY, R. L. O.; SANTIAGO, M. C. P. A.; FELBERG, I.; OLIVEIRA, M. C. N. Isoflavone, anthocyanin, and fatty acid contents of vegetable-type soybean grains at different maturity stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. 1-8, 2019.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa: Editora UFV, 2012. 239 p.

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

CASSOL, G. V. **Sistema de implantação, irrigação e alterações fisiológicas de plantas de soja sob cultivo em terras baixas**. 2017. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2017.

CHAGANTI, V. N.; CULMAN, S. W.; HERMS, C.; SPRUNGER, C. D.; BROCK, C.; SOTO, A. L.; DOOHAN, D. Base cation saturation ratios, soil health, and yield in organic field crops. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 4190-4200, 2021.

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

CHEN, J.; GABELMAN, W. H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. **Scientia Horticulturae**, v. 83, p. 213-225, 2000.

CHILUNDO, M. J. A.; WESSTRÖM, I.; BRITO, R.; MESSING, I. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. **Field Crops Research**, v. 200, p. 143-162, 2017.

CLAIR, S. B. S.; LYNCH, J. P. The opening of Pandora's Box: climate change impacts on soil fertility and crop nutrition in developing countries. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1-2, p. 101-115, 2010.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos – safra 2023/ 2024 – 12º levantamento**. Brasília: CONAB, v. 11, n. 12, 2024. 116 p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 10 nov. 2024a.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Série Histórica das Safras. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=10>>. Acesso em: 27 nov. 2024b.

COSTA, A. R. **As relações hídricas das plantas vasculares**. Évora: Universidade de Évora, 2001. 75 p.

COSTA, E. D. **Arranjo de plantas, características agronômicas e produtividade de soja**. 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Botucatu, 2013.

COSTA, J. R. da; PINHO, J. L. N. de; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de. **Cultivo do milho**. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção: Sete Lagoas, 6. ed. 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/27037/1/Plantio.pdf>>. Acesso em: 5 abr. de 2021.

CUNHA, G. O. de M.; ALMEIDA, J. A. de; COELHO, C. M. M. Chemical composition of soybean seeds subjected to fertilization with rock dusts. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 44, p. 1-17, 2022.

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

DAWSON, I. K., RUSSELL, J., POWELL, W., STEFFENSON, B., THOMAS, W. T. B., WAUGH, R. Barley: a translational model for adaptation to climate change. **New Phytologist**, v. 206, p. 913-931, 2015.

DECHEN, A. R. Deficiência de cálcio e magnésio nos solos e nas plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 15., 1982, Campinas, (Acidez e calagem no Brasil). Campinas. **Anais [...]** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p. 87-95.

DESCLAUX, D.; HUYNH, T-T.; ROUMET, P. Identification of Soybean Plant Characteristics That Indicate the Timing of Drought Stress. **Crop Science**, v. 40, p. 716-722, 2000.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, n. 1, p. 61-70, 1996.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO. Irrigation and drainage Paper, 33).

DORNBOS, D. L.; MULLEN, R. E.; SHIBLES, R. E. Drought stress effects during seed fill on soybean seed germination and vigor. **Crop Science**, v. 29, p. 476-480, 1989.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Milho**. Sistema de produção. Versão Eletrônica, 9ª edição. 2015. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistema_sdeproducao6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p_76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicId=8658>. Acesso em: 30 março 2021.

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**, v. 27, n. 6, p. 1348-1353, 2003.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of fields crops**. New York: M. Dekker, 1991. 476 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4. ed. Piracicaba: Livro Ceres, 2004. 360 p.

FAOSTAT - Statitical databases. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>>. Acesso em: 27 nov. 2024.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. p. 261-277.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p. 185-212, 2009.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. *In*: FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 115-153.

FERRÃO, R. G.; MOREIRA, S. O.; FERRÃO, M. A. G.; RIVA-SOUZA, E. M.; ARANTES, L. de O.; COSTA, A. de F. S.; CARVALHO, P. L. P. T.; GALVÊAS, P. A. O. Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**, v. 6 e 7, p. 51-71, 2016.

FERREIRA, E.; BÜLL, L. T. Características fisiológicas, absorção de nutrientes e desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) em função do nível de potássio e estresse hídrico. **Irriga**, v. 2, n. 1, p. 14-28, 1997.

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**, v. 58, n. 3, p. 342-349, 2011.

FIOREZE, S. L.; RODRIGUES, J. D.; CARNEIRO, P. C.; SILVA, A. A.; LIMA, M. B. Fisiologia e produção da soja tratada com cinetina e cálcio sob déficit hídrico e sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 11, p. 1432-1439, 2013.

FLOSS, E. L.; CAEIRÃO, E.; CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F. Aveia. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos**: O fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. p. 261-277.

FREITAS, C. D. M.; OLIVEIRA, F. S.; MESQUITA, H. C.; CORTEZ, A. O.; PORTO, M. A. F.; SILVA, D. V. Effect of competition on the interaction between maize and weed exposed to water deficiency. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 3, p. 719-729, 2019.

FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; NASCIMENTO JUNIOR, A. dos; MINELLA, E.; CAIERÃO, E. Rendimento e valor nutritivo de cereais de inverno de duplo propósito: forragem verde e silagem ou grãos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 11, p. 2116-2120, 2009.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; OLIVEIRA, J. T. de; LEHMEN, R. I.; DREON, G. Gramíneas forrageiras anuais de inverno. *In*: FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S. **Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul-Brasileira**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012. p. 12-172.

FREIRE, M. M. **Aspectos fisiológicos de milho em função do nível de umidade do solo e formas de adubação**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, 2020.

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

FRIZZONE, J. A. **Desempenho e otimização dos sistemas de irrigação**. Piracicaba: Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, 2017.

FUMIS, T. de F.; PEDRAS, J. F.; SAMPAIO, A. C. Análise de crescimento de cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) submetidos a déficits hídricos, na região de Bauru-SP. **Irriga**, v. 2, n. 3, p. 101-114, 1997.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 6, p. 349-359, 2015.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GIONGO, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências – Área de concentração: Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – USP, Piracicaba, 2011.

GLAZ, B.; MORRIS, D. R.; DAROUB, S. H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. **Crop Science**, v. 44, p. 1633-1641, 2004.

GOMES, F. T.; BORGES, A. C.; NEVES, J. C. L.; FONTES, P. C. R. Influência de doses de calcário com diferentes relações cálcio: magnésio na produção de matéria seca e na composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1779-1786, 2002.

GOMES, G. P. **Influência de gotejadores com saída de água tipo fenda e cilíndrica na intrusão radicular em irrigação subsuperficial na cultura do milho**. 2019. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Botucatu, 2019.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. de G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; CASTRO, A. P.; MORAIS JÚNIOR, O. P. Physiological parameters to select upland rice genotypes for tolerance to water deficit. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 7, p. 534-540, 2015.

GUIMARÃES, F. S.; REZENDE, P. M.; CASTRO, E. M.; CARVALHO, E. A.; ANDRADE, M. J. B. de; CARVALHO, E. R. Cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] para cultivo de verão na região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 4, p. 1099-1106, 2008.

GUIMARÃES JÚNIOR, M. P. A.; SANTOS, A. C.; ARAÚJO, A. S.; OLIVEIRA, L. B. T.; RODRIGUES, M. O. D.; MARTINS, A. D. Relação Ca:Mg do corretivo da acidez do solo e as características agronômicas de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 14, n. 3, p. 460-471, 2013.

HATSCHBACH, M.; BORTOLOTO, R.P.; CAPITANIO, J. Avaliação de acessos de arroz vermelho resistentes a imidazolinonas no Rio Grande do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 25., 2004, Águas de São Pedro. **Anais...** Londrina: SBCPD. 2004. 1 CD-ROM.

HERNÁNDEZ, R. J. M. **Efeito da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e nível de fósforo sobre a produção de matéria seca e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.)**. 1994. 134 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – USP, Piracicaba, 1994.

HERNÁNDEZ, R. J. M; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.). **Scientia Agricola**, v. 55, n. 1, p. 79-85, 1998.

HIATT, A. J.; LEGGETT, L. E. Ionic interactions and antagonisms in plants. *In*: CARSON, E. W. **The Plant Root and Its Environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 101-134.

HOLZSCHUH, M. J. **Eficiência de calcário calcítico e dolomítico na correção da acidez de solos sob plantio direto**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2007.

HONG, Y.; ZHANG, G. The influence of drought stress on malt quality traits of the wild and cultivated barleys. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 8, p. 2009-2015, 2020.

HORTENSTINE, C. C.; OZAKI, H. Y. The effect of liming on the availability of the Fe and Mn on soil Ca and pH on a Davi Fine sand soil. **Soil Crop Sciences**, v. 21, p. 44-50, 1961.

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

JADOSKI, S. O.; KLAR, A. E. **Fisiologia do estresse por deficiência hídrica: Cultura do pimentão**. 1. ed. Guarapuava: Edição do autor, 2011.

JAHROMI, M. N.; RAZZAGHI, F.; ZAND-PARSA, S. Strategies to increase barley production and water use efficiency by combining deficit irrigation and nitrogen fertilizer. **Irrigation Science**, v. 41, p. 261-275, 2023.

KAISER, W. M. Effects of water deficits on photosynthetic capacity. **Physiologia Plantarum**, v. 71, n. 2, p. 142-149, 1987.

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

KEY, J. L.; KURTZ, TUCKER, B. B. Influence of ratio of exchangeable calcium-magnesium on yield and composition of soybeans and corn. **Soil Science**, v. 93, n. 4, p. 265-270, 1962.

LANGE, A.; CAVALLI, E.; PEREIRA, C. S.; CHAPLA, M. V.; FREDDI, O. S. Relações cálcio:magnésio e características químicas do solo sob cultivo de soja e milho. **Nativa**, v. 9, n. 3, p. 294-301, 2021.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. de O.; MIRANDA, J. R. P. de. Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 74-79, 2011.

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

LIMA, J. A.; DEFELIPO, B. V.; NOVAIS, R. F.; THIÉBAUT, J. T. L. Efeito das relações Ca/Mg e (Ca+Mg)/K na correção da acidez de dois latossolos e na produção de matéria seca do tomateiro (*Lycopersicum esculentum*, Mill) cv. 'Kada'. **Revista Ceres**, v.18, p. 103-115, 1981.

LUCIANO JUNIOR, G. S. **Influência de relações cálcio/magnésio em calcários no rendimento de massa seca de culturas em casa-de-vegetação**. 2018. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. de; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; KARAM, D.; MAGALHÃES, M. M.; CANTÃO, F. R. de O. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 3, p. 223-232, 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola**: Nutrição de plantas e fertilizantes do solo. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1976. 528 p.

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. *In*: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 179-238.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

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

MARQUES, D. M. **Déficit hídrico e doses de nitrogênio na morfofisiologia e produção de genótipos de milho inoculados por *Azospirillum brasilense***. 2019. 79 f. Tese (Doutorado em Botânica Aplicada) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

MARQUES, K. R.; SERAGLIO, N. A.; PIMENTEL JUNIOR, J. M.; SOUSA, P. L. R.; RAUBER, W. A.; CAVAZZINI, P. H.; FIDELIS, R. R. Bioativador de solo e planta e adubação fosfatada nas características de rendimento da cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 11, p. 1-16, 2022.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINS, A. O. **Inferências genético-fisiológicas da tolerância à seca em milho**. 2012. 122 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes, 2012.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, p. 799-806, 2008.

MEINERZ, G. R.; OLIVO, C. J.; FONTANELI, R. S.; AGNOLIN, C. A.; HORST, T.; BEM, C. M. de. Produtividade de cereais de inverno de duplo propósito na depressão central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 4, p. 873-882, 2012.

MELLO, J. L. P.; SILVA, L. D. B. **Irrigação**. Departamentos de Engenharia, UFRRJ: Seropédica, 2007.

MILA, A. J.; AKANDA, A. R.; SARKAR, K. K. Determination of Crop Co-efficient Values of Soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) by Lysimeter Study. **The Agriculturists**, v. 14, n. 2, p. 14-23, 2016.

MOLLAH, M. S. I.; PAUL, N. K. Responses of Irrigation and Fertilizers on the Growth and Yield of *Hordeum vulgare* L. **Bangladesh journal of scientific and industrial research**, v. 46, n. 3 p. 369-374, 2011.

MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 30-45, 2017.

MORAIS, W. A.; CUNHA, F. N.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B.; SILVA, N. F.; COSTA, C. T. S. Avaliação das características de produção do feijoeiro submetidos a variações de lâminas de irrigação e doses de adubação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1389-1397, 2017.

MOREIRA, A.; CARVALHO, J. G.; ENVAGELISTA, A. R. Influência da relação cálcio:magnésio do corretivo na nodulação, produção e composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 249-255, 1999.

MULATU, B.; LAKEW, B. Barley research and development in Ethiopia-an overview. In: MULATU, B.; GRANDO, E. **Barley research and development in Ethiopia**. Addis Ababa: ICARDA, 2011. p. 1-18.

NAGAZ, K.; TOUMI, I.; MASMOUDI, M. M.; MECHLIA, N. B. Soil salinity and barley production under full and deficit irrigation with saline water. **Research Journal of Agronomy**, v. 2, n. 3, p. 90-95, 2008.

NEWTON, A. C.; FLAVELL, A. J.; GEORGE, T. S.; LEAT, P.; MULLHOLLAND, B.; RAMSAY, L.; REVOREDO-GIHA, C.; RUSSELL, J.; STEFFENSON, B. J.; SWANSTON, J. S.; THOMAS, W. T. B.; WAUGH, R.; WHITE, P. J.; BINGHAM, I. J. Crops that feed the world 4. Barley: a resilient crop? Strengths and weaknesses in the context of food security. **Food Security**, v. 3, p. 141-178, 2011.

OLIVEIRA, E. F.; PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Respostas das mudas de cafeeiro ao equilíbrio entre cátions trocáveis em solos com cargas variáveis. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 37, p. 973-979, 1994.

OLIVEIRA, E. L.; PARRA, M. S. Resposta do feijoeiro a relações variáveis entre cálcio e magnésio na capacidade de troca de cátions de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 859-866, 2003.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A.; MASCARENHAS, H. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 329-335, 2001.

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 439-445, 2004.

OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, L.; SILVA, C. M. Estimativa da demanda hídrica da soja utilizando modelo de balanço hídrico do solo e dados da previsão do tempo. **Irriga**, v. 25, n. 3, p. 492-507, 2020.

OVIEDO, A. F. P.; HERZ, R.; RUDORFF, B. F. T. Efeito do estresse hídrico e da densidade de plantio no uso da radiação e produtividade da cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Biociência**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 23-33, 2001.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 39 p. (IAPAR. Circular, 76).

PEDERSEN, A. C. Déficit hídrico em milho: caracterização fisiológica e inoculação com *Azospirillum brasilense*. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

PEGORARE, A. B.; FEDATTO, E.; PEREIRA, S. B.; SOUZA, L. C. F.; FIETZ, C. R. Irrigação suplementar no ciclo do milho "safrinha" sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 262-271, 2009.

PEITER, M. X. **Resposta da irrigação suplementar em diferentes cenários para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

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

PHILLIPS, W. A.; DALRYMPLE, R. L.; KLEPER, B. L.; RAO, S. C. Annual cool-season grasses. In: MOSER L. E.; BUXTON, D. R.; CASLER, M. D. Cool-season forage grasses. Madison: ASA, CSSA, and SSSA, 1996. p. 781-802.

PIAS, O. H. de C.; LOWE, M. A.; DAMIAN, J. M.; SANTI, A. L.; TREVISAN, R. Componentes de rendimento e produtividade de híbridos de milho em função de doses de NPK e de déficit hídrico em estádios fenológicos críticos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 4, p. 422-432, 2017.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191 p.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 16 set. 2022.

RAIJ, B. **Avaliação da fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fósforo, 1983. 142 p.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RANDIN, B.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. D.; BERGONCI, I.; FRANÇA, S. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento das plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1-2, p. 7-16, 2003.

RAY, J. D.; GESCH, R. W.; SINCLAIR, T. R.; ALLEN, L. H. The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. **Plant and Soil**, v. 239, p. 113-121, 2002.

REIS, E. M.; CASA, R. T.; MEDEIROS, C. A. **Diagnose, patometria e controle de doenças de cereais de inverno**. Londrina: ES Comunicação, 2001. p. 94

REIS JÚNIOR, R. A. **Produção, qualidade de tubérculos e teores de potássio no solo e no pecíolo de batateira em resposta à adubação potássica**. 1995. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

RIES, L.; PURCELL, L.; CARTER, T. E.; EDWARDS, J. T.; Physiological Traits Contributing to Differential Canopy Wilting in Soybean under Drought. **Crop Science**, v. 52, p. 272-281, 2012.

RODRIGUES, T. R.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Water availability to soybean crop as a function of the least limiting water range and evapotranspiration. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n. 2, p. 161-167, 2017.

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

ROMERO, J. L.; MAGALHÃES, P. C.; ALVES, J. D.; DURÃES, F. O. M.; VASCONCELLOS, C. A. Efeito do cálcio sobre algumas características biofísicas e morfológicas de plantas de milho BRS-4154 submetidas ao alagamento do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 3, p. 21-33, 2003.

ROSOLEM, C. A.; MATEUS, G. P.; GODOY, L. J. G.; FELTRAN, J. C.; BRANCALIAO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 875-884, 2003.

RUIZ, H. A.; MIRANDA, J. CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 1015-1018, 1999.

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. Qualidade da irrigação controlada por tensiômetros em pivô central. **Scientia Agrícola**, v. 51, n. 3, p. 549-555, 1994.

SALASSIER, B.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.

SALINAS, A.; ZELENER, N.; CRAVIOTTO, R.; BISARO, V. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica en el suelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 331-338, 1996.

SALVADOR, J. T.; CARVALHO, T. C.; LUCCHESI, L. A. C. Relações cálcio e magnésio presentes no solo e teores foliares de macronutrientes. **Revista Acadêmica**, v. 9, n. 1, p. 27-32, 2011.

SANCHES, F. M.; CUNHA, F. F. da; SANTOS, O. F. dos; SOUZA, E. J. de; LEAL, A. J. F.; THEODORO, G. de F. Desempenho agrônomo de cultivares de cevada cervejeira sob diferentes lâminas de irrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 89-102, 2015.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; BAIER, A. C.; TOMM, G. O. **Principais forrageiras para integração lavoura-pecuária, sob plantio direto, nas Regiões Planalto e Missões do Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 142 p.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S.; DEL LUCA, L. de J. A.; TEIXEIRA, M. C. C.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do; MINELLA, E.; CAEIRÃO, E.; MORI, C. Potencial de rendimento de cereais de inverno de duplo propósito. In: SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R.S. **Cereais de inverno de duplo propósito para a integração lavoura pecuária no sul do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. p. 37-64.

SANTOS, A. B. A. dos; KLAR, A. E.; JADOSKI, C. J. Parâmetros fisiológicos de cultivares de cevada sob déficits hídricos. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 438-448, 2008.

SANTOS, D. dos; GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J.; FIOREZE, S. L. MACEDO JUNIOR, E. K. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em

casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 836-842, 2012.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, C.; BARROS, H. B. Cultivares. *In*: SEDIYAMA, T. (ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenias, 2009. p. 77-92.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 346 p.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos Cultivos: Informações para uma Agricultura Sustentável. *In*: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília: INMET, 2009. p. 263-277.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 1, p. 1-18, 2015.

SETIYONO, T. D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G. DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007.

SILVA, A. J. P.; 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, 2014.

SILVA, D. J.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Fluxo de massa e difusão de enxofre para raízes de milho em solos ácidos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 22, n. 1, p. 109-114, 1998.

SILVA, E. B.; FERREIRA, E. A.; PEREIRA, G. A. M.; SILVA, D. V.; OLIVEIRA, A. J. M. Peanut plant nutrient absorption and growth. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 653-661, 2017.

SILVA, J. C.; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1030-1036, 2011.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

STANLEY, R. L. Cool-season grasses. Ryegrass, small grains, and tall fescue. *In*: CHAMBLISS, C. **Florida forage handbook**. Gainesville: University of Florida, 1999. p. 65-67.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop Yield Response to Water**. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012. 500 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TARDIEU, F. Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance: just design the right drought scenario. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 25-31, 2012.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Efeito do déficit de pressão de vapor do ar na modulação da condutância estomática e suas implicações na assimilação fotossintética do carbono em plantas de eucalipto mantidas irrigadas e sob déficit hídrico. *In*: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. **Anais [...]** Aracaju: EMBRAPA, 2007.

THOMÉ, R. D.; AMABILE, R. F.; SOUZA, N. O. S.; MALAQUIAS, J. V.; MELO, J. V. P. Genetic parameter estimates in irrigated barley genotypes in the Brazilian savanna of the Federal District. **Revista Caatinga**, v. 37, p. 1-7, 2024.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Safra Mundial de Soja 2023/24 – 9º Levantamento do USDA. Informativo. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-soja/>> Acesso em: 25 fevereiro 2024a.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Safra Mundial de Milho 2023/24 – 10º Levantamento do USDA. Informativo. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 25 fevereiro 2024b.

VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, p. 523-539, 2006.

VIVAN, G. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; BARBOZA, F. S.; BUSKE, T. C. **Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação**. Irriga, v. 18, n. 2, p. 282-292, 2013.

WIJEWARDANA, C.; REDDY, K. R.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, J.; GOLDEN, B. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science**, v. 36, p. 241-255, 2018.

WILLIAMS, D. E.; COLEMAN, N. T. Cation exchange properties of plant root surfaces. **Plant and Soil**, v. 2, p. 243-256, 1950.

WU, Y.; HUANG, M.; WARRINGTON, D. N. Growth and transpiration of maize and winter wheat in response to water deficits in pots and plots. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, p. 65-71, 2011.

WU, X.; XU, Y.; SHI, J.; ZUO, Q.; ZHANG, T.; WANG, L.; XUE, X.; BEN-GAL, A. Estimating stomatal conductance and evapotranspiration of winter wheat using a soil plant water relations-based stress index. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 303, p. 1-14, 2021.

YOU, J.; CHAN, Z. ROS Regulation During Abiotic Stress Responses in Crop Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1-15, 2015.

YU, Y.; JIANG, Z.; WANG, G.; KATTEL, G. R.; CHUAI, X.; SHANG, Y.; ZOU, Y.; MIAO, L. Disintegrating the impact of climate change on maize yield from human management practices in China . **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 327, p. 1-10, 2022.

ZHU, X. -G.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 235-261, 2010.