



PAULO CÁSSIO ALVES LINHARES

TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS DE *Coffea arabica* L. SUPLEMENTADAS COM MAGNÉSIO FOLIAR

**LAVRAS - MG
2021**

PAULO CÁSSIO ALVES LINHARES

**TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS DE *Coffea arabica* L.
SUPLEMENTADAS COM MAGNÉSIO FOLIAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori

Coorientador

Dr. Fernando Cesar Bachiega Zambrosi

**LAVRAS - MG
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Linhares, Paulo Cássio Alves.

Tolerância ao déficit hídrico de mudas de *Coffea arabica* L.
suplementadas com magnésio foliar / Paulo Cássio Alves Linhares.
- 2021.

99 p. : il.

Orientador(a): Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori.

Coorientador(a): Fernando Cesar Bachiega Zambrosi.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Café arábica. 2. Deficiência hídrica. 3. Sulfato de magnésio.
I. Marchiori, Paulo Eduardo Ribeiro. II. Zambrosi, Fernando Cesar
Bachiega. III. Título.

PAULO CÁSSIO ALVES LINHARES

**TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS DE *Coffea arabica* L.
SUPLEMENTADAS COM MAGNÉSIO FOLIAR**

**TOLERANCE TO WATER DEFICIT OF *Coffea arabica* L. SEEDLINGS
SUPPLEMENTED WITH FOLIAR MAGNESIUM**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 31 de agosto de 2021.

Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori - UFLA

Dra. Cynthia de Oliveira - UFLA

Dra. Antonia Almeida da Silva - UFLA

Dr. Fernando Cesar Bachiega Zambrosi - IAC

Dr. Eduardo Gusmão Pereira - UFV



Orientador

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori

Coorientador

Dr. Fernando Cesar Bachiega Zambrosi

LAVRAS - MG

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus avós paternos Maria Eulina da Silva e Clementino Linhares, e minha avó materna Cícera Alves dos Santos. À minha madrinha Ritinha Linhares.
(*In Memoriam*).

Ofereço

À minha mãe Damiana Alves Linhares e ao meu pai Francisco Francimar Linhares, que me ensinaram as lições do trabalho, da honestidade e da dignidade com simplicidade e verdadeiro amor.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, saúde, coragem, sabedoria, fraternidade e humildade que me são concedidos todos os dias, que me fazem superar todas as dificuldades que surgem ao longo desta caminhada.

À minha família, em especial aos meus pais Damiana Alves Linhares e Francisco Francimar Linhares e aos meus irmãos Kaio Vinícius Alves Linhares, Tássio José Alves Linhares e Maria José Alves Linhares, por acreditarem em mim, pelo apoio, torcida e principalmente pelo amor, que independente de qualquer coisa sempre estarão ao meu lado. Com carinho, à minha sobrinha Ana Cecília, nova integrante da família, que veio para somar amor e alegria.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal (PPGFV), pelo espaço, estrutura e oportunidade de cursar meu doutorado e adquirir novos conhecimentos, contribuindo na minha formação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, me proporcionando condições de cursar a Pós-Graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) por apoiar o PPGFV.

Ao meu Orientador Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori, pelos ensinamentos, apoio, conselhos, compreensão e por acreditar no meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu Coorientador Fernando Cesar Bachiega Zambrosi, pelas dicas durante a execução do projeto, análises dos dados e resultados.

Aos membros da banca examinadora, Cynthia de Oliveira, Antonia Almeida da Silva, Eduardo Gusmão Pereira, Fernando Cesar Bachiega Zambrosi, e aos suplentes Vitor de Laia Nascimento e Lissa Vasconcellos Vilas Boas, pelo aceite do convite e contribuições para melhorar este trabalho.

Às minhas colegas do doutorado Zulma Catherine e Antonia Almeida, que se tornaram minhas grandes amigas e parceiras de trabalhos, uma amizade que levarei para a vida, as quais considero como irmãs, e ambas me deram duas sobrinhas da ciência, a Isabela e a Valentina, por quem tenho muito carinho.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Bioquímica e Fisiologia Molecular de Plantas (LBFMP), em especial a Catherine, Antonia, Paulo César, Ludmila, Patrícia, Beatriz, Lissa Vasconcellos, Bárbara, Kamila Dázio, Alexander e Ketlen, pela amizade, conselhos, contribuições no meu trabalho e estudos durante o doutorado.

À minha colega do LBFMP, Maria Eduarda a quem tive a oportunidade de ser Coorientador de Iniciação Científica, proporcionando novas experiências.

Ao Núcleo de Estudos em Fisiologia Vegetal (NEF), onde aprendi muito com os colegas e amigos da coordenação, sendo coordenador de Finanças, em grande parte do meu doutorado; uma experiência enriquecedora que tive.

A todo o corpo docente, discente e coordenação do PPGFV pelo apoio e ensinamentos nessa jornada.

À Salete, secretária do PPGFV por todo o apoio e orientações durante o meu doutorado.

Aos trabalhadores e zeladores do PPGFV Joel, Odorêncio e Hamilton, pelo apoio nos experimentos e amizade.

À minha orientadora do Mestrado, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Jailma Suerda, por todos os conselhos e apoio para eu vir cursar o doutorado.

Aos colegas e amigos da UFERSA Aridônia Peixoto, Josimar Silva e Toni Halan, pelo incentivo e torcida para eu cursar o doutorado.

Aos amigos de moradia e conterrâneos Lissa Izabel, Jandeilson Pereira e Francisco Hélio, pela convivência, companheirismo e amizade, durante o doutorado.

Aos amigos que fiz no PPGFV e agregados, que guardarei para a vida, Daniel, Marília, Josyelem, Ana Maria, Mayra, Dawyson, Andréa, Ane Marcela, Layane, Lillian, Melina, Lermen, Joyce, Héctor, Moisés, Manoel Linhares, Ludmila Bastos, Paulo César, Waltemberg, Alan, Cleidson, Camila, Viviana e Janete.

Aos colegas e amigos que conheci em Lavras, Ronan, Cláudio, Josiele e Pâmela pelos momentos de dança e descontração no forró.

A todos que contribuíram direta/indiretamente para que eu concluísse esta jornada, fazendo parte da realização de um sonho.

OBRIGADO A TODOS!

RESUMO

Coffea arabica L. é uma das espécies perenes mais cultivadas comercialmente, porém o déficit hídrico é o estresse abiótico mais limitante à mesma, afetando negativamente sua atividade fotossintética e rendimento. Com isso, sendo o magnésio (Mg) o cofator enzimático atuante no processo fotossintético e na translocação de açúcares, a hipótese de que cafeeiros suplementados com Mg foliar apresentariam tolerância à seca devido à manutenção da produção e translocação de açúcares, maior acúmulo de carboidratos no sistema radicular, além de melhor recuperação do status hídrico e aparato fotossintético quando reidratadas, foi testada. Assim, objetivou-se avaliar se a aplicação foliar de Mg em cafeeiros sob déficit hídrico estimularia a manutenção da atividade fotossintética e o acúmulo de carboidratos no sistema radicular. Mudanças de cafeeiro (cultivar Mundo Novo) foram submetidas à duas suplementações de Mg ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) foliar (Controle, Mg0% e Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)]. Foram realizadas avaliações em três momentos definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC). Foi avaliado: *status* hídrico foliar; biometria; trocas gasosas; atividade fotoquímica; carboidratos em folha velha (FV), nova (FN) e raiz (R); teor e acúmulo de nutrientes foliar, além da eficiência no uso dos nutrientes (EUN) e o índice de tolerância ao estresse (ITS), através da massa seca da raiz (MSR) e total (MST). Em 50% CC houve manutenção do número de folhas (NF), assimilação de CO_2 (A), e transpiração (E), assim como maior ITS_{MSR} e ITS_{MST} , nas plantas DH + Mg2%. Houve redução significativa do potencial hídrico foliar ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$), conteúdo relativo de água (CRA), açúcares solúveis totais em raiz (AST_R), amido em folha velha (AmidoFV) e sacarose em raiz (SAC_R), nas plantas DH + Mg2%. Em 30% CC, foi verificada diferença significativa entre os tratamentos de Mg foliar, apresentando menor ITS_{MSR} e ITS_{MST} . Os maiores valores das trocas gasosas foram observados nas plantas H + Mg2%, porém acumularam menos amido nos tecidos analisados. No entanto, as plantas com DH + Mg2% apresentaram os maiores valores de AST_R , SAC_R e eficiência intrínseca no uso da água (EUAi), em relação às plantas DH + Mg0%. Na REC, não foi observada diferença significativa entre os tratamentos com Mg foliar para o potencial hídrico foliar, CRA e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), ocorrendo recuperação do status hídrico. Após REC, as plantas DH + Mg2% obtiveram maior EUAi, relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO_2 (ETR/A), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), MSR, razão de matéria seca de raiz/parte aérea (R/PA), AST_{FV} , SAC_{FV} , AmidoR, AST_R e SAC_R , cálcio (Ca), potássio (K) e Mg. Foi encontrado maior teor e acúmulo de Mg foliar nas plantas que receberam este tratamento. As plantas H + Mg2% apresentaram maior EUN, para N, K e Ca. Portanto, as mudas de cafeeiros suplementadas com Mg foliar foram mais tolerantes ao déficit hídrico moderado, através da manutenção da atividade fotossintética, da maior translocação de açúcares e do maior acúmulo de amido na raiz. Sob boa disponibilidade hídrica, mudas de cafeeiro apresentam maior eficiência no uso dos nutrientes quando suplementados Mg foliar.

Palavras-chave: café arábica, deficiência hídrica, sulfato de magnésio, fotoassimilados, crescimento.

ABSTRACT

Coffea arabica L. is one of the most commercially cultivated perennial species, but water deficit is the most limiting abiotic stress to it, negatively affecting its photosynthetic activity and yield. Thus, magnesium (Mg) being the enzymatic cofactor acting in the photosynthetic process and in the translocation of sugars, the hypothesis that coffee trees supplemented with Mg on the leaves would present drought tolerance due to the maintenance of sugar production and translocation, greater accumulation of carbohydrates in the system root, in addition to better recovery of water status and photosynthetic apparatus when rehydrated, was tested. Thus, aimed to evaluate whether Mg foliar application in coffee trees under water deficit would stimulate the maintenance of photosynthetic activity and the accumulation of carbohydrates in the root system. Coffee seedlings (cultivar Mundo Novo) were submitted to two leaf Mg supplements ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Control, Mg0% and Mg2%) and two water conditions [wellwatered (WW) and water deficit (WD)]. Assessments were performed at three times defined based on the intensity of stress [50 and 30% of the field capacity (FC)] and rehydration (REC). It was evaluated: leaf water status; biometric; gas exchange; photochemical activity; carbohydrates in old leaf (OL), new (NL) and root (R); foliar nutrient content and accumulation, in addition to nutrient use efficiency (NUE) and the stress tolerance index (STI), through root dry mass (RDM) and total dry mass (TDM). In 50% FC there was maintenance of the number of leaves (NL), CO_2 assimilation (A), and transpiration (E), as well as higher STI_{RDM} and STI_{TDM} , in WD + Mg2% plants. There was a significant reduction in leaf water potential at dawn ($\Psi_{\text{w}_{\text{pd}}}$), relative water content (RWC), total soluble sugars in root (TSS_R), starch in old leaf (Starch_{OL}) and sucrose in root (SUC_R) in WD + Mg2% plants. In 30% FC, there was a significant difference between the treatments of Mg leaf, showing lower STI_{RDM} and STI_{TDM} . The highest values of gas exchange were observed in plants WW + Mg2%, but they accumulated less starch in the analyzed tissues. However, plants with WD + Mg2% presented the highest values of TSS_R, SUC_R and intrinsic water use efficiency (WUE_i), in relation to plants WD + Mg0%. In REC, no significant difference was observed between treatments with leaf Mg for leaf water potential, RWC and instantaneous carboxylation efficiency (A/C_i), with recovery of water status. After REC, WD + Mg2% plants had higher WUE_i, ratio between apparent electron transport and CO_2 assimilation (ETR/A), photochemical fluorescence extinction coefficient (qP), RDM, root/shoot ratio (RDM/SDM), TSS_{OL}, SUC_{OL}, Starch_R, TSS_R and SUC_R, calcium (Ca), potassium (K) and Mg. Greater content and accumulation of Mg in leaves were found in plants that received this treatment. Plants WW + Mg2% had higher EUN, for N, K and Ca. Therefore, coffee seedlings supplemented with foliar Mg were more tolerant to moderate water deficit, through the maintenance of photosynthetic activity, of the greater translocation of sugars and of the greater accumulation of starch in the root. Under good water availability, coffee seedlings show greater efficiency in the use of nutrients when supplemented with foliar Mg.

Keywords: Arabica coffee, water deficit, magnesium sulfate, photoassimilates, growth.

LISTA DE FIGURAS

Figuras da PRIMEIRA PARTE

- Figura 1** - Concentração de sacarose [A] e clorofila ($a + b$) [B], em folhas de beterraba açucareira após 25 dias de tratamento com fornecimento adequado e sob deficiência de magnésio.....19

Figuras da SEGUNDA PARTE

- Figura 1**- Temperaturas mínima (T Min), média (T Med) e máxima (T Max) e umidade relativa do ar, durante os três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....32
- Figura 2** - Representação esquemática dos tratamentos de aplicação de Mg foliar e da condição hídrica, impostos nos três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....33
- Figura 3** - Consumo de água diário (A) e total (B), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....42
- Figura 4** - Potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$) [A] e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$) [B] e conteúdo relativo de água (CRA) [C] de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....43
- Figura 5** - Altura de planta (AP) [A], diâmetro do caule (DC) [B], número de folhas (NF) [C] e comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP) [E], área foliar (AF) [E], massa foliar específica (MFE) [F] e índice SPAD (SPAD) [G], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....45
- Figura 6** - Assimilação de CO₂ (A) [A], transpiração (E) [B] e eficiência do uso da água (EUA) [C] considerando todas as folhas do dossel vegetativo, antes e após déficit hídrico, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], durante o primeiro momento de avaliação, definido a partir da intensidade do estresse [50% da capacidade de campo (CC)].....47
- Figura 7** - Assimilação de CO₂ (A) [A], condutância estomática (gs) [B], transpiração (E) [C] e concentração interna de CO₂ (Ci) [D] de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas

- condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....48
- Figura 8** - Eficiência intrínseca do uso de água (EUA_i) [A] e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) [B] de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....50
- Figura 9** - Taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) [A], eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/F_m'$) [B], coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP) [C] e relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A) [D], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).....51
- Figura 10** - Açúcares redutores (AR) [A, C e E] e solúveis totais (AST) [B, D e F] em folha nova (FN), folha velha (FV) e raiz (R), respectivamente, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....53
- Figura 11** - Amido [A, C e E] e sacarose (SAC) [B, D e F] em folha nova (FN), folha velha (FV) e raiz (R), respectivamente, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....55
- Figura 12** - Teor [A] e o acúmulo foliar [B] de magnésio (Mg), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).....56
- Figura 13** - Teor e acúmulo foliar, respectivamente, de nitrogênio (N) [A e B], fósforo (P) [C e D], potássio (K) [E e F] e cálcio (Ca) [G e H], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).....58
- Figura 14** - Eficiência no uso do nutriente (EUN), de magnésio (EUN_{Mg}, A), nitrogênio (EUN_N, B), fósforo (EUN_P, C), potássio (EUN_K, D) e cálcio (EUN_{Ca}, E), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC)..... 60
- Figura 15** - Massa seca da parte aérea (MSPA) [A], relação raiz/parte aérea (R/PA) [B], massa seca da raiz (MSR) [C] e total (MST) [D], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....62
- Figura 16** - Índice de tolerância ao estresse pela massa seca da raiz (ITS_{MSR}) [A] e pela

massa seca total (ITS_{MST}) [B], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)].....63

Figura 17 - Análise de componentes principais (PCA), das variáveis que apresentaram mais correlação positiva ($p < 0,05$), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50% (A) e 30% (B) da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC, C).....65

Figura 18 - Mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50% (A) e 30% (B) da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....67

Figuras do ANEXO

Figura A1 - Representação esquemática da câmara que foi construída para análise de assimilação de CO_2 (A) e transpiração (E) [A], considerando todas as folhas do dossel vegetativo; câmara cobrindo o dossel vegetativo da planta (sistema fechado) [B] e analisador de gases por infravermelho (SBA-5, PP Systems, EUA) [C].....85

Figura A2 - Análise de correlação ($p < 0,05$) das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], no momento de avaliação de 50% da capacidade de campo (CC), definido a partir da intensidade do estresse.....86

Figura A3 - Análise de correlação ($p < 0,05$) das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], no momento de avaliação de 30% da capacidade de campo (CC), definido a partir da intensidade do estresse.....87

Figura A4 - Análise de correlação ($p < 0,05$), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).....88

Figura A5 - Teor de nutrientes nas folhas de mudas de cafeeiro antes da aplicação dos tratamentos.....89

LISTA DE TABELAS

Tabelas do ANEXO

- Tabela 1** - Resultado da análise química do substrato homogêneo (solo + areia) utilizado no experimento.....90
- Tabela 2** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....91
- Tabela 3** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....92
- Tabela 4** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....93
- Tabela 5** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiros submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....94
- Tabela 6** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....95
- Tabela 7** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk) após a transformação dos dados, das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC)..... 96
- Tabela 8** - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk) após a transformação dos dados, das variáveis analisadas, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).....97

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	13
1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Atividade fotossintética do cafeeiro	16
2.2	O déficit hídrico afeta o desempenho produtivo do cafeeiro	17
2.3	Suplementação de magnésio foliar em cafeeiros.....	18
	REFERÊNCIAS	21
	SEGUNDA PARTE - ARTIGO	26
	TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS DE <i>Coffea arabica</i> L. SUPLEMENTADAS COM MAGNÉSIO FOLIAR	27
	RESUMO	27
	ABSTRACT	28
1	INTRODUÇÃO	29
2	MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1	Condução experimental e tratamentos	32
2.2	Características analisadas.....	35
2.3	Análise estatística.....	40
3	RESULTADOS	41
3.1	Consumo de água e status hídrico.....	41
3.2	Crescimento das plantas	44
3.3	Trocas gasosas e fluorescência da clorofila <i>a</i>	46
3.4	Acúmulo de carboidratos.....	52
3.5	Teor e acúmulo de nutrientes foliar e eficiência no uso do nutriente	56
3.6	Acúmulo de massa seca e índice tolerância ao estresse.....	61
3.7	Análise de componentes principais (PCA)	63
3.8	Representação dos tratamentos.....	66
4	DISCUSSÃO	69
5	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXOS	84

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Cafeeiro (*Coffea arabica* L.), é uma das plantas mais cultivadas no mundo, e o Brasil tem grande destaque na produção e exportação dessa *commodity*. Em 2020, a produtividade média nacional foi de 33,5 sacas ha⁻¹. Porém, para o ano atual, é estimada queda nesse rendimento, devido as características de bienalidade da cultura (CONAB, 2021). Isso pode ser ainda mais afetado devido às condições climáticas desfavoráveis, como elevação da temperatura e baixos índices de pluviosidade, o que pode causar déficit hídrico no cafeeiro e limitar sua produção (CHONÉ et al., 2001; MENEZES-SILVA et al., 2017).

O déficit hídrico é classificado como um dos estresses abióticos que mais limitam a produtividade das culturas (KANECHI et al., 1988), por afetar o crescimento e o desenvolvimento, ativando respostas na planta, como a perda de turgor celular, estimulando o fechamento parcial ou total dos estômatos (PELOSO et al., 2017; SANCHES et al., 2017; MENEZES-SILVA et al., 2017). Isso resulta em limitações difusivas e bioquímicas (ARAUJO et al., 2008; BATISTA et al., 2012; MENDES et al., 2017), podendo comprometer o aparato fotossintético (MENEZES-SILVA et al., 2017). Durante os momentos de redução da fotossíntese, a planta faz o consumo das reservas energéticas que havia produzido quando em condições favoráveis ao crescimento (DaMATTA et al., 2018).

As principais reservas são os carboidratos, que são sintetizados nas folhas durante o processo fotossintético e armazenados em compartimentos específicos, para suprirem a demanda dos tecidos e órgãos vegetativos (PEREIRA et al., 2016). Esses carboidratos são chamados de carboidratos não-estruturais, como o amido e os açúcares solúveis redutores e não-redutores (LAVIOLA et al., 2007). Esses carboidratos são consumidos no processo de respiração celular (GALHO et al., 2007; REICH et al., 2016), dessa forma, usam a energia acumulada nestes compostos orgânicos para gerar energia utilizável e poder redutor, como também, liberar esqueletos de carbono, necessários ao metabolismo para manutenção do crescimento (GALHO et al., 2007; XU et al., 2015).

Porém, essas reservas suprem as demandas energéticas por determinado tempo e em condições de déficit hídrico mais severo (KANECHI et al., 1988), pode ocorrer a limitação do crescimento das plantas resultado da redução potencial hídrico dos tecidos associado a redução da disponibilidade de substrato para o processo respiratório. As limitações no crescimento são observadas em todas as partes da planta, seja na parte aérea ou na raiz

(MORISON et al., 2008; SICHER et al., 2012). Desse modo, o déficit hídrico limita o rendimento do cafezal, podendo ser mais crítico no caso do transplântio das mudas do viveiro para o campo (MATIELLO et al., 2005; SENAR, 2017), pois o processo de transplântio promove um estresse mecânico causando fraturas no sistema radicular, reduzindo as conexões das raízes com o solo, dificultando a absorção de água do solo pela planta. Dessa forma as plantas necessitam de um período de aclimação, além de adequado fornecimento de água, para garantir a reestruturação do sistema radicular no novo ambiente da rizosfera favorecendo a sobrevivência das mudas (MATIELLO et al., 2005; SANTINATO; SILVA, 2001).

Por outro lado, o uso de técnicas agrícolas pode estimular a tolerância das plantas a esse estresse abiótico. A suplementação nutricional que fortalece o metabolismo vegetal, uma vez que os nutrientes minerais estão envolvidos em no metabolismo e fisiologia das plantas (MARSCHNER, 2012). Com isso, a adubação foliar poder ser empregada (FERNÁNDEZ et al., 2006), como no caso da suplantação dos cafeeiros com magnésio (Mg) foliar. O Mg é um elemento mineral essencial para a planta por ser cofator de várias enzimas da fotossíntese, estando diretamente relacionado com o crescimento (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004; GEIGER, 2011).

Desta maneira, como o déficit hídrico afeta a produção e translocação de açúcares, o Mg pode ser um atenuante aos seus efeitos deletérios, pois, pode estimular a manutenção da produção de carboidratos e, também a translocação para outros órgãos (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004; TRÄNKNERA et al., 2018), mantendo a relação fonte-dreno adequada ao crescimento do sistema radicular nessas condições de limitação de água. Com isto, pode haver o favorecimento do crescimento e desenvolvimento pelo aumento da translocação e acúmulo de reservas energéticas (ROSA et al., 2009; ALVES et al., 2011).

Portanto, testou-se a hipótese de que cafeeiros suplementados com Mg foliar podem ser mais tolerantes ao déficit hídrico por manterem a atividade fotossintética para a produção e translocação de açúcares, estimulando o acúmulo de carboidratos na raiz, mantendo o crescimento e desenvolvimento, além de melhor recuperação do status hídrico e do aparato fotossintético após o retorno da disponibilidade hídrica no solo. Assim sendo, objetivou-se avaliar se a suplementação de Mg foliar em mudas de cafeeiro sob déficit hídrico aumenta a produção e translocação de açúcares da parte aérea para raiz, favorecendo o melhor desempenho das plantas em condições de seca.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Atividade fotossintética do cafeeiro

O cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) pertencente à família Rubiaceae, é uma das espécies mais cultivadas no mundo, juntamente com o robusta (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), dominando o comércio mundial de café, correspondendo a cerca de 99% da produção mundial (DaMATTA et al., 2018). Dessa produção, o Brasil destaca-se como maior produtor mundial, sendo em 2020 o rendimento médio de 33,5 sacas ha⁻¹ (CONAB, 2021). Seu centro de origem é a Etiópia, em regiões de altitudes entre 1300 a 2000 metros, desenvolvendo-se sob condições de baixa luminosidade, sendo adaptado às regiões tropicais (WINTGENS, 2004). Essas adaptações das plantas ao ambiente luminoso, ocorrem devido às diferentes características fisiológicas e morfológicas (LARCHER, 2000), que variam de níveis subcelulares à macroscópicos (BALAGUER et al., 2001), aumentando o desempenho fotossintético das mesmas (POORTER, 2001).

Além da radiação que é interceptada, a temperatura foliar também influencia na resposta estomática e atividade fotossintética dentro do dossel vegetativo. Desse modo, a planta apresenta variações na capacidade fotossintética em diferentes folhas, podendo causar limitações difusivas e bioquímicas (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1997), como, alterações nas reações fotoquímicas e atividade enzimática durante a fase bioquímica da fotossíntese, além das enzimas do metabolismo dos carboidratos e do nitrogênio (KANECHI et al., 1996; PAUL; DRISCOLL, 1997).

Quando cultivados em condições de baixa luminosidade os cafeeiros desenvolvem plantas mais altas, com folhas maiores e mais finas, proporcionando melhor captação da radiação disponível (FAHL et al., 1994). Assim, a regulação da atividade fotossintética é diretamente dependente dos fatores como as condições de luminosidade, temperatura, além da disponibilidade hídrica e nutrientes (MORAIS et al., 2003).

Dessa forma, para alcançar a produtividade adequada são necessárias condições ótimas de manejo e dos fatores ambientais (água, nutrientes minerais, luminosidade, temperatura do ar e concentração atmosférica de CO₂), proporcionando alta eficiência fotossintética. Com isso, as plantas utilizam a radiação fotossinteticamente ativa, no processo da fotoquímica (formação de ATP e NADPH), para a produção de compostos orgânicos, através da assimilação líquida do CO₂ (XU et al., 2015; CARDONA et al., 2018). Com a

produção de carboidratos, as mesmas mantêm seu crescimento e desenvolvimento, sendo que, os principais carboidratos formados são os não-estruturais, como o amido e açúcares solúveis redutores e não-redutores, nos quais, a sacarose é o principal açúcar translocável (LAVIOLA et al., 2007; ALVES et al., 2011).

Assim sendo, é fundamental fazer o manejo adequado do cafezal para manter um adequado crescimento e desenvolvimento, proporcionado uma boa produtividade. Para isso, são importantes os tratos culturais, como o fornecimento de água e manutenção das plantas com bom estado nutricional. Isso deve ser considerado desde a implantação do campo de produção, como a produção e transplante das mudas, que é uma fase crítica da atividade cafeeira, devido aos danos causados no sistema radicular da muda durante essa prática agrícola (MATIELLO et al., 2005; SANTINATO; SILVA, 2001), bem como em todo o processo produtivo do cafeeiro.

2.2 O déficit hídrico afeta o desempenho produtivo do cafeeiro

A baixa pluviosidade e a distribuição irregular das chuvas, podem resultar em déficit hídrico para os cafeeiros, principalmente quando acompanhado por elevação da temperatura ambiente (SILVEIRA et al., 2016). Dessa forma, a restrição hídrica pode causar modificações no metabolismo da planta. Dentre estas, pode ser mencionada as alterações nas trocas gasosas, uma vez que, em condições de déficit hídrico, ocorre a perda de turgor celular, em que as plantas respondem com o fechamento estomático (parcial ou total), para amenizar a perda de água pela transpiração (PELOSO et al., 2017; SANCHES et al., 2017; MENEZES-SILVA et al., 2017), porém, como consequência disso, diminuir a entrada do CO₂ necessário para a produção de carboidratos (RONCHI et al., 2015; SILVEIRA et al., 2016; MENEZES-SILVA et al., 2017), causando limitações difusivas e bioquímicas (PARRY et al., 2002; ARAUJO et al., 2008; BATISTA et al., 2012; MENDES et al., 2017). Por outro lado, a diminuição na condutância estomática pode reduzir a transpiração foliar e aumentar a eficiência do uso da água (EUA) (DaMATTA et al., 2019).

De acordo com o tempo e intensidade do déficit hídrico, pode ocorrer danos no aparato fotossintético do cafeeiro (MENEZES-SILVA et al., 2017), causando danos nos fotossistemas (PELOSO et al., 2017). Esses danos estão relacionados com o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO's), pois o sistema de defesa da planta (enzimático e não-enzimático) estará prejudicado (DaMATTA et al., 2018; DaMATTA et al.,

2019). Além disso, o déficit hídrico pode afetar a concentração dos pigmentos fotossintéticos em folhas de cafeeiros (PELOSO et al., 2017).

Outro fator que é diretamente afetado pela baixa disponibilidade de água no solo é potencial hídrico do cafeeiro, ocasionando valores reduzidos à media que se evolui a restrição hídrica, principalmente quando associado à elevação na temperatura e luminosidade (SILVA et al., 2015; RONCHI et al., 2015; SILVEIRA et al., 2016), deixando-o em condições de déficit hídrico (RONCHI et al., 2015; DOMINGHETTI et al., 2016; PELOSO et al., 2017; CAMPOS et al., 2019). Com isto, há uma redução expressiva no conteúdo relativo de água nas folhas, à medida que se reduzem os níveis de água disponíveis no solo, sugerindo que os mesmos sofrem uma desidratação do protoplasma, interferindo no crescimento celular (PELOSO et al., 2017).

Da mesma forma, as reservas de carboidratos do cafeeiro podem ser restringidas com a imposição do déficit hídrico, por causa do consumo de suas reservas energéticas para a manutenção da respiração (DaMATTA et al., 2018; CAMPOS et al., 2019).

Todas essas modificações causadas pelo déficit hídrico no metabolismo do cafeeiro, levam à restrição do seu crescimento e desenvolvimento. Cafeeiros quando submetidos à condições de seca, apresentam uma menor altura da planta, menor produção de massa seca (parte aérea e raiz) e reduções no diâmetro do caule e área foliar (DOMINGHETTI et al., 2016; RIBEIRO et al., 2017; CAMPOS et al., 2019), ocasionando queda na produtividade do cafezal (ALVES et al., 2011; DaMATTA et al., 2018).

2.3 Suplementação de magnésio foliar em cafeeiros

Além do fornecimento adequado de água, é importante fazer o manejo da adubação. Assim, se mantém o desempenho produtivo dos cafeeiros, garantido o investimento na atividade (LIVRAMENTO et al., 2003; PEREIRA et al., 2008; ALVES et al., 2011). Desse modo, é importante manter a nutrição mineral das plantas, para manter a atividade fotossintética, produção de carboidratos, além de macromoléculas, como aminoácidos e proteínas, que estão diretamente ligados com o crescimento, desenvolvimento e produtividade (MARSCHNER, 2012).

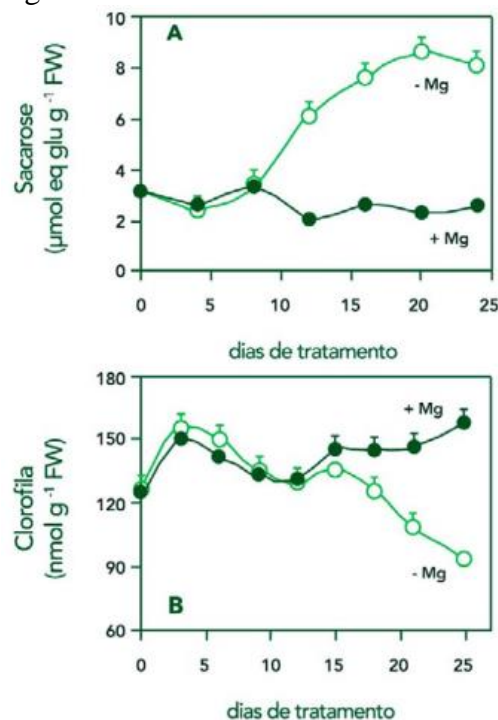
Neste contexto, manter o fornecimento de todos os macros e micronutrientes é fundamental para o metabolismo vegetal. No entanto, com a fertilização química no solo de forma desequilibrada, por longos períodos, principalmente com o fornecimento de nitrogênio,

fósforo e potássio (NPK), é comum ocorrer a deficiência de magnésio (Mg) nas plantas, devido às altas concentrações de potássio (K), que inibe a absorção do Mg (SALMON, 1963; HEENAN; CAMPBELL, 1981; GUO et al., 2016). Isso ocorre devido ao antagonismo entre esses nutrientes, pois competem pelo mesmo transportador. Assim, devido à maior concentração K na solução do solo, o mesmo é mais absorvido, deixando as plantas com deficiência de Mg (CAKMAK, 2013; GUO et al., 2016).

Por outro lado, assim como K, o Mg também atua na regulação osmótica das células vegetais, por ser um íon osmoticamente ativo, mantendo o turgor celular (MARSCHNER, 2012; GERENDÁS; FÜHRS, 2013). Outras funções nas plantas que esses dois nutrientes estão envolvidos, é na atividade fotossintética, além da produção e translocação de carboidratos, mantendo a relação fonte-dreno (TRÄNKNER et al., 2018).

Nesse sentido, o Mg é importante para as plantas na produção de açúcares, como a sacarose, e conseqüentemente, na translocação de açúcares (Figura 1A); assim como, por ser constituinte da molécula de clorofila, que é fundamental para os pigmentos vegetais (Figura 1B) (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004; GEIGER, 2011; TRÄNKNER et al., 2018).

Figura 1 - Concentração de sacarose [A] e clorofila (*a + b*) [B], em folhas de beterraba açucareira após 25 dias de tratamento com fornecimento adequado e sob deficiência de magnésio.



Fonte: Hermans et al. (2004), adaptado por Lobato e Soares Filho (2018).

Com isso, o Mg é importante para manter a relação fonte-dreno adequada ao crescimento e desenvolvimento da planta, favorecendo a partição e alocação de biomassa, que é primordial para o crescimento e desenvolvimento da planta (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004). Dessa forma, torna-se importante o manejo nutricional dos cafeeiros para manter a atividade fotossintética, favorecendo a produção e translocação de açúcares, que é importante para o desempenho produtivo (LIVRAMENTO et al., 2003; ROSA et al., 2009; ALVES et al., 2011).

No entanto, como relatado anteriormente, o déficit hídrico pode limitar o desempenho produtivo das plantas (KANECHI et al., 1988). Assim, uma alternativa prática é a suplementação de Mg foliar, como suporte à adubação química no solo, devido às importantes funções desse elemento nas plantas (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004; FERNÁNDEZ et al., 2006), o que pode proporcionar melhor desempenho produtivo, nessas condições de baixa disponibilidade hídrica no solo.

Portanto, essa prática pode ser viável para amenizar essas alterações causadas pelo déficit hídrico no cafeeiro, pois, como o Mg está diretamente relacionado na produção e translocação de açúcares, uma suplementação com este nutriente pode melhorar o desempenho de cafeeiros sob eventos de déficit hídrico. Assim, a suplementação de Mg foliar pode ser uma alternativa ao produtor, principalmente na fase de transplântio das mudas para o campo, onde ocorrem grandes perdas, por motivo do estresse intrínseco a essa ação, devido a danos radiculares no manejo e no processo de aclimatação e “pegamento”, sobretudo, quando associado a um período de baixos índices pluviométricos (CAVALCANTI FILHO, 2017).

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. D.; PAGLIS, C. M.; LIVRAMENTO, D. E.; LINHARES, S. S. D.; BECKER, F. B.; MESQUITA, A. C. Source-sink manipulations in *Coffea arabica* L. and its effect on growth of shoots and root system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, n. 5, p. 956 -964, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000500013
- ARAÚJO, W. L.; DIAS, P. C.; MORAES, G. A. B. K.; CELIN, E. F.; CUNHA, R. L.; BARROS, R. S.; DaMATTA, F. M. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 46, n. 10, p. 884-890, 2008. DOI: 10.1016/j.plaphy.2008.05.005
- BALAGUER, L.; MARTÍNEZ-FERRI, E.; VALLADARES, F.; PÉREZ-CORONA, M. E.; BAQUEDANO, F. J.; CASTILLO, F. J.; MANRIQUE, E. Population divergence in the plasticity of the response of *Quercus coccifera* to the light environment. **Functional Ecology**, v. 15, p. 124-135, 2001. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2001.00505.x
- BATISTA, K. D.; ARAÚJO, W. L.; ANTUNES, W. C.; CAVATTE, P. C.; MORAES, G. A. B. K.; MARTINS, S. C. V.; DAMATTA, F. M. Photosynthetic limitations in coffee plants are chiefly governed by diffusive factors. **Trees**, v. 26, p. 459-468, 2012. DOI: 10.1007/s00468-011-0606-2
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 45, n. 9, p. 1245-1250, 1994. DOI: 10.1093/jxb/45.9.1245
- CAKMAK, I. Magnesium in crop production, food quality and human health. **Plant Soil**, v. 368, p. 1-4, 2013. DOI: 10.1007/s11104-013-1781-2
- CAMPOS, C. N.; ÁVILA, R. G.; SOUZA, K. R. D.; AZEVEDO, L. M.; ALVES, J. D. Melatonin reduces oxidative stress and promotes drought tolerance in Young *Coffea arabica* L. plants. **Agricultural Water Management**, v. 211, p. 37-47, 2019. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.09.025
- CARDONA, T.; SHAO, S.; NIXON, P. J. Enhancing photosynthesis in plants: the light reactions. **Essays in Biochemistry**, v. 62, n. 1, p. 85-94, 2018. DOI: 10.1042/EBC20170015
- CAVALCANTI FILHO, F. M. **Silicato de potássio na aclimação de mudas de *Coffea arabica* L.** 65 f.: il. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2017.
- CHONÉ, X.; LEEUWEN C.V.; DUBOURDIEU, D.; GAUDILLÈRE, J.P. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. **Annals of Botany**, v. 87, n. 4, p. 477-483, 2001. DOI: 10.1006/anbo.2000.1361
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento safra brasileira de café.** Safra 2021 - segundo levantamento, Brasília, v.8, nº 2, p. 1-63, maio 2021.

DaMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04537

DaMATTA, F. M.; RAHN, E.; LÄDERACH, P.; GHINI, R.; RAMALHO, J. C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? **Climatic Change**, v. 152, p. 167-178, 2019. DOI: 10.1007/s10584-018-2346-4

DOMINGHETTI, A. W.; SOUZA, A. J. J.; SILVEIRA, H. R. O.; SANT'ANA, J. A. V.; SOUZA, K. R. D.; GUIMARÃES, R. J.; LACERDA, J. R. Tolerância ao déficit hídrico de cafeeiros produzidos por estaquia e embriogênese somática. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 117 - 126, 2016.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; VEGA, J.; MAGALHÃES, A. C. Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, v. 69, n. 1, p. 161-169, 1994. DOI: 10.1080/14620316.1994.11515262

FERNÁNDEZ, V.; RÍO, V. D.; ABADÍA, J.; ABADÍA, A. Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* (L.) Batsch): effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. **Plant and Soil**, v. 289, p. 239-252, 2006. DOI: 10.1007/s11104-006-9132-1

GALHO, A. S.; LOPES, N. F.; BACARIN, M. A.; SOUZA LIMA, M. G. Composição química e respiração de crescimento em frutos de *Psidium cattleyanum* Sabine durante o ciclo de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 061-066, 2007. DOI: 10.1590/S0100-29452007000100014

GEIGER, D. Plant sucrose transporters from a biophysical point of view. **Molecular Plant**, v. 4, n. 3, p. 395-406, 2011. DOI: 10.1093/mp/ssr029

GERENDÁS, J.; FÜHRS, H. The significance of magnesium for crop quality. **Plant and Soil**, v. 368, p. 101-128, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1555-2

GUO, W.; NAZIM, H.; LIANG, Z.; YANG, D. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. **The Crop Journal**, v. 4, n. 2, p. 83-91, 2016. DOI: 10.1016/j.cj.2015.11.003

HEENAN, D. P.; CAMPBELL, L. C. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). **Plant and Soil**, v. 61, p. 447-456, 1981. DOI: 10.1007/BF02182025

HERMANS, C.; JOHNSON, G.N.; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v. 220, n. 2, p. 344-355, 2004. DOI: 10.1007/s00425-004-1340-4

KANECHI, M.; UCHIDA N.U.; YASUDA, T.; YAMAGUCHI, T. Relationships between leaf water potential and photosynthesis of *Coffea arabica* L. grown under various environmental conditions as affected by withholding irrigation and re-irrigation. **Japanese Journal of Tropical Agriculture**, v. 32, n.1, p. 16-21, 1988. DOI: 10.11248/jsta1957.32.16

KANECHI, M.; UCHIDA, N.; YASUDA, T.; YAMAGUCHI, T. Non-stomatal inhibition associated with inactivation of Rubisco in dehydrated coffee leaves under unshaded and shaded conditions. **Plant and Cell Physiology**, v. 37, n. 4, p. 455-460, 1996. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a028967

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of Woody Plants**. San Diego: Academic Press. 1997, 411p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D.; MENDONÇA, S. M.; NETO, A. P. Alocação de fotoassimilados em folhas e frutos de cafeeiro cultivado em duas altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.11, p. 1521-1530, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007001100002

LIVRAMENTO, D. E.; ALVES, J. D.; BARTHOLO, G. F.; GUIMARÃES, P. T. G.; MAGALHÃES, M. M.; PEREIRA, T. A. Influência da produção nos níveis de carboidratos e recuperação de cafeeiros após recepagem. **Revista Ceres**, v. 50, n. 292, p.737-752, 2003.

LOBATO, E.; SOARES FILHO, J.N. **A importância da reposição anual de magnésio ao cafeeiro**. IBAR NORDESTE. 2018. Disponível em: <www.ibarnordeste.com.br/agromag>. Acessado em: 05/03/21.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D.R. **Cultura do café no Brasil**: novo manual de recomendações. Varginha: PROCAFÉ, 2005. 438p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. third ed. Academic Press, London, 2012. DOI: 10.1016/C2009-0-63043-9

MENDES, K. R.; MARENCO, R. A.; NASCIMENTO, H. C. S. Velocidade de carboxilação da Rubisco e transporte de elétrons em espécies arbóreas em resposta a fatores do ambiente na Amazônia central. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 947-959, 2017. DOI: 10.5902/1980509828666.

MENEZES-SILVA, P. E.; SANGLARD, L. M. P. V.; ÁVILA, R. T.; MORAIS, L. E.; MARTINS, S. C. V.; NOBRES, P.; PATREZE, C. M.; FERREIRA, M. A.; ARAÚJO, W. L.; FERNIE, A. R.; DaMATTa, F. M. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 15, p. 4309-4322, 2017. DOI: 10.1093/jxb/erx211

MORAIS, H.; MARUR, C. J.; CARAMORI, P. H.; RIBEIRO, A. M. A.; GOMES, J. C. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a

pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003001000001

MORISON, J. I. L.; BAKER, N. R.; MULLINEAUX, P. M.; DAVIES, W. J. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 639-658, 2008. DOI: 10.1098/rstb.2007.2175.

PAUL, M. J.; DRISCOLL, S. P. Sugar repression of photosynthesis: the role of carbohydrates in signaling nitrogen deficiency through source: sink imbalance. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, n. 1, p. 110-116, 1997. DOI: 10.1046/j.1365-3040.1997.d01-17.x

PARRY, M. A. J.; ANDRALOJC, J.; KHAN, S.; LEA, P. J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of Botany**, v. 89, n. 7, p. 833-839, 2002. DOI: 10.1093/aob/mcf103

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; AMARAL, J. F. T. Limitações do crescimento vegetativo em cafeeiro arábica promovido pelo déficit hídrico. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p.139-147, 2017. DOI: 10.13083/reveng.v25i2.755

PEREIRA, G. P.; ZANETTE, F.; BIASI, L. A.; CARVALHO, R. I. N. Atividade respiratória de meristemas apicais de ramos plagiotrópicos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 203-211, 2016. DOI: 10.5902/1980509821113

PEREIRA, T. A.; ALVES, J. D.; ABRAHÃO, S. A.; ABRAHÃO, J. E.; FRIES, D. D.; LIVRAMENTO, D. E.; DEUNER, S. Carboidratos, redutase do nitrato e restabelecimento de mudas “passadas” de cafeeiros após a poda em diferentes alturas. **Revista Ceres**, v. 55, n. 3, p. 236-242, 2008.

POORTER, L. Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species. **Functional Ecology**, v. 15, n. 1, p. 113-123, 2001.

REICH, P. B.; SENDALL, K. M.; STEFANSKI, A.; WEI, X.; RICH, R. L.; MONTGOMERY, R. A. Boreal and temperate trees show strong acclimation of respiration to warming. **Nature**, v. 531, n. 31, p. 633-638, 2016. DOI: 10.1038/nature17142

RIBEIRO, A. F. F.; MATSUMOTO, S. N.; RAMOS, P. A. S.; SANTOS, J. L. D.; TEIXEIRA, E. C.; D'ARÊDE, L. O.; VIANA, A. E. S. Paclobutrazol e restrição hídrica no crescimento e desenvolvimento de plantas de café. **Coffee Science**, v. 12, n. 4, p. 534 - 543, 2017.

ROSA, M.; PRADO, C.; PODAZZA, G.; INTERDONATO, R.; GONZÁLEZ, J. A.; HILAL, M.; PRADO, F. E. Soluble sugars - metabolism, sensing and abiotic stress: a complex network in the life of plants. **Plant Signalling & Behavior**, v. 4, n. 5, p. 388-393, 2009. DOI: 10.4161/psb.4.5.8294

RONCHI, C. P.; ARAÚJO, F. C.; ALMEIDA, W. L.; SILVA, M. A. A.; MAGALHÃES, C. E. O.; OLIVEIRA, L. B.; DRUMOND, L. C. D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros

submetidos ao deficit hídrico para concentração da florada no Cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.1, p.24-32, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000100003

SALMON, B. R. C. Magnesium relationships in soils and plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 605-610, 1963. DOI: 10.1002/jsfa.2740140901

SANCHES, R. F. E.; CATARINO, I. C. A.; BRAGA, M. R.; SILVA, E. A. Influência da alta concentração atmosférica de CO₂ (\uparrow [CO₂]atm) \times disponibilidade hídrica nas relações hídricas, trocas gasosas e acúmulo de carboidratos em *Coffea arabica* L. **Hoehnea**, v. 44, n. 4, p. 635-643, 2017. DOI: 10.1590/2236-8906-33/2017

SANTINATO, R.; SILVA, V.A. **Tecnologias para produção de mudas de café**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001. 116p.

SENAR - Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: construção de viveiros e produção de mudas**. Brasília: SENAR, 1ª ed. 2017. 72 p.

SICHER, R. C.; TIMLIN, D.; BAILEY, B. Responses of growth and primary metabolism of water-stressed barley roots to rehydration. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, n. 7, p. 686-695, 2012. DOI: 10.1016/j.jplph.2012.01.002

SILVA, V. A.; SALGADO, S. M. L.; SÁ, L. A.; REIS, A. M.; SILVEIRA, H. R. O.; MENDES, A. N. G.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; PEREIRA, A. A. Uso de características fisiológicas na identificação de genótipos de café arábica tolerantes ao *Meloidogyne paranaenses*. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 242 - 250, 2015.

SILVEIRA, H. R. O.; SANTOS, M. O.; SILVA, V. A.; VENTURIN, R. P.; VOLPATO, M. M. L.; DANTAS, M. F.; CARVALHO, G. R.; SETOTAW, T. A.; MOREIRA, F. C.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; RESENDE, M. L. V. Impactos da deficiência hídrica nas respostas ecofisiológicas e espectrais do cafeeiro consorciado com espécies madeireiras. **Coffee Science**, v. 11, n. 3, p. 318 - 328, 2016.

TRÄNKNERA, M.; TAVAKOLB, E.; JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 414-431, 2018. DOI: 10.1111/ppl.12747

XU, Z.; JIANG, Y.; ZHOU, G. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidante systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00701

WINTGENS, J. N. The Coffee Plant. In: WINTGENS, J. N. (ed) **Coffee: growing, processing, sustainable production: a guidebook for growers, processors, traders, and researchers**, Wiley, New York, Chapter 1, p. 1-24, 2004. DOI: 10.1002/9783527619627.ch1

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO DE MUDAS DE *Coffea arabica* L. SUPLEMENTADAS COM MAGNÉSIO FOLIAR

Paulo Cássio Alves Linhares¹; Zulma Catherine Cardenal Rubio¹; Antonia Almeida da Silva¹; Patrícia Mara de Oliveira¹; Paulo César de Souza Júnior¹; Ludmila da Silva Bastos¹; Fernando Cesar Bachiega Zambrosi²; Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori^{1*}

¹Instituto de Ciências Naturais, Departamento de Biologia, Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, Universidade Federal de Lavras, 37200-900, Lavras, MG, Brasil

²Centro de Solos e Recursos Agroambientais - Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 13012-970 - Campinas, SP, Brasil

*Corresponding author: paulo.marchiori@ufla.br

RESUMO

A *Coffea arabica* L., assim como as demais espécies perenes, são afetadas pelo déficit hídrico, devido à sensibilidade de sua atividade fotossintética e manutenção do *status* hídrico a esse estresse abiótico. Considerando que o magnésio (Mg) é cofator de várias enzimas e participa da translocação de açúcares, testou-se a seguinte hipótese: cafeeiros suplementados com Mg foliar apresentam tolerância à seca devido à manutenção da atividade fotossintética para a produção e translocação de açúcares, estimulando o acúmulo de carboidratos na raiz, para o crescimento e desenvolvimento, assim como, melhor recuperação do *status* hídrico e do aparato fotossintético após reidratação. Objetivou-se avaliar se a aplicação foliar de Mg em cafeeiros sob déficit hídrico estimularia a translocação de açúcares e crescimento radicular. Plantas jovens de cafeeiro (cultivar Mundo Novo) foram submetidas à duas suplementações de Mg ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC). Avaliaram-se: potencial hídrico foliar ($\Psi_{w_{md}}$ e $\Psi_{w_{pd}}$) e conteúdo relativo de água (CRA); biometria da planta; trocas gasosas e atividade fotoquímica; acúmulo de carboidratos em folha velha (FV), nova (FN) e raiz (R); teor e acúmulo de nutrientes foliar; eficiência no uso dos nutrientes (EUN) e o índice de tolerância ao estresse (ITS), pela massa seca da raiz (MSR) e total (MST). Na primeira coleta (50% CC), as plantas DH + Mg2% mantiveram o número de folhas (NF), assimilação de CO_2 (A), e transpiração (E) semelhantes ao controle, além de obterem maior ITS_{MSR} e ITS_{MST} . As plantas DH + Mg2% reduziram o $\Psi_{w_{pd}}$, CRA, açúcares solúveis totais em raiz (AST_R), amido em folha velha (AmidoFV) e sacarose em raiz (SAC_R). No entanto, houve aumento de MSR, relação raiz/parte aérea (R/PA), SAC_{FV} e AmidoR. Já na segunda coleta (30% CC), não houve diferença entre os tratamentos com Mg em condições de seca, apresentando menor ITS_{MSR} e ITS_{MST} devido ao estresse hídrico severo. Porém, as plantas H + Mg2% obtiveram os maiores valores das trocas gasosas, no entanto, reduziram o acúmulo de amido nos tecidos estudados. Neste período, houve maior AST_R , SAC_R e eficiência intrínseca no uso da água (EUAi) das plantas com DH + Mg2% do que em plantas com DH + Mg0%. No período de REC, houve recuperação do *status* hídrico, sem diferença entre os tratamentos com Mg, para o CRA, e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci). No entanto, as plantas DH + Mg2% apresentaram maior EUAi, relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO_2 (ETR/A), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), MSR, R/PA, cálcio (Ca), potássio (K) e Mg, quando reidratadas. Maior teor de Mg foliar foi observado nas plantas com este tratamento. As plantas H + Mg2%

apresentaram maior EUN para EUN_N, EUN_K e EUN_{Ca}, diferindo das plantas H + Mg0%. Além disso, estas plantas aumentaram AST_{FV}, SAC_{FV}, amido_R, AST_R e SAC_R. Mudanças de cafeeiros se apresentam mais tolerantes ao déficit hídrico moderado quando suplementadas com Mg foliar por manter a atividade fotossintética, além da maior translocação de açúcares e acúmulo de amido na raiz. A suplementação com Mg foliar aumenta a eficiência no uso dos nutrientes em cafeeiros sob boa disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: Cafeeiro, seca, Mg, fotossíntese, carboidratos.

ABSTRACT

The *Coffea arabica* L., as well as other perennial species, are affected by water deficit, due to the sensitivity of its photosynthetic activity and maintenance of water status to this abiotic stress. Considering that magnesium (Mg) is the cofactor of several enzymes and participates in the translocation of sugars, the following hypothesis was tested: coffee trees supplemented with foliar Mg would present drought tolerance due to the maintenance of photosynthetic activity for the production and translocation of sugars, stimulating the accumulation of carbohydrates in the root, for growth and development, as well as better recovery of water status and photosynthetic apparatus after rehydration. Aimed to evaluate whether the foliar application of Mg in coffee trees under water deficit would stimulate sugars translocation and root growth. Young coffee plants (cultivar Mundo Novo) were submitted to two foliar Mg supplements (MgSO₄ · 7H₂O) (Without, Mg0% and With, Mg2%) and two water conditions [wellwatered (WW) and water deficit (WD)], in three evaluation moments defined from the intensity of the stress [50 and 30% of the field capacity (FC)] and rehydration (REC). The following were evaluated: leaf water potential (Ψ_{wmd} and Ψ_{wpd}) and relative water content (RWC); plant biometrics; gas exchange and photochemical activity; accumulation of carbohydrates in old leaf (OL), new (NL) and root (R); leaf nutrient content and accumulation; nutrient use efficiency (NUE) and the stress tolerance index (STI), by root dry mass (RDM) and total dry mass (TDM). In the first collect (50% FC), the WD + Mg2% plants maintained the number of leaves (NL), CO₂ assimilation (A), and transpiration (E) similar to the control, in addition to obtaining higher STI_{RDM} and STI_{TDM}. WD + Mg2% plants reduced Ψ_{wpd} , CRA, total soluble sugars in root (TSS_R), starch in old leaf (Starch_{OL}) and sucrose in root (SUC_R). However, there was an increase in RDM, root/shoot ratio (RDM/SDM), SUC_{OL} and Starch_R. In the second collect (30% FC), there was no difference between treatments with Mg in dry conditions, with lower STI_{RDM} and STI_{TDM} due to severe water stress. However, the plants WW + Mg2% had the highest values of gas exchange, however, they reduced the accumulation of starch in the tissues studied. During this period, there was higher TSS_R, SUC_R and intrinsic water use efficiency (WUE_i) of plants with WD + Mg2% than in plants with WD + Mg0%. During the REC period, there was recovery of water status, with no difference between treatments with Mg, for RWC, and instantaneous carboxylation efficiency (A/Ci). However, WD + Mg2% plants had higher WUE_i, relationship between apparent electron transport and CO₂ assimilation (ETR/A), photochemical fluorescence extinction coefficient (qP), RDM, RDM/SDM, calcium (Ca), potassium (K) and Mg, when rehydrated. Higher leaf Mg content was observed in plants with this treatment. Plants WW + Mg2% had higher NUE for NUE_N, NUE_K and NUE_{Ca}, differing from plants WW + Mg0%. In addition, these plants increased TSS_{OL}, SUC_{OL}, Starch_R, TSS_R and SUC_R. Coffee seedlings are more tolerant to moderate water deficit when supplemented with foliar Mg for maintaining photosynthetic activity, in addition to greater translocation of sugars and accumulation of

starch in the root. Foliar Mg supplementation increases nutrient use efficiency in coffee plants under good water availability.

Keywords: Coffee tree, drought, Mg, photosynthesis, carbohydrates.

1 INTRODUÇÃO

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) é uma das espécies mais cultivadas no Brasil e no mundo, sendo uma das principais *commodities* agrícolas de importância na geração de emprego e renda. Porém, o déficit hídrico pode causar impacto direto em seu crescimento e desenvolvimento, visto que é considerado o principal fator abiótico que limita o rendimento das culturas. Essa limitação é dependente da disponibilidade hídrica e da duração da fase de estresse hídrico (CHONÉ et al., 2001; PARRY et al., 2005; MORISON et al., 2008). Os danos causados pela seca podem ser classificados de moderado a severo, sendo influenciados pela fase fenológica da planta, além de suas respostas de aclimatação ou de mecanismos de adaptação ao estresse apresentados pela espécie (DaMATTA et al., 2002; PARRY et al., 2005; DaMATTA et al., 2010). Estudos de Kanechi et al. (1988), indicam que o cafeeiro está sob déficit hídrico moderado quando a planta apresenta um potencial hídrico foliar maior que -2,0 MPa, sendo mais severo quando menor que -2,2 MPa.

Neste contexto, dependendo da espécie, cultivar, fase fenológica, e outras características, quando as plantas estão sob condições ambientais de déficit hídrico moderado, podem manter a atividade fotossintética e o turgor celular por determinado período (BOYER, 1970; MORISON et al., 2008). Entretanto, com o aumento da severidade da seca, a planta ativa mecanismos de defesa que pode atenuar seus efeitos deletérios (MORISON et al., 2008; MARTINS et al., 2019). O primeiro mecanismo de adaptação à seca é o escape, no qual as plantas completam seu ciclo de vida antes do período de seca. Já o segundo, é o de evitamento, onde as plantas ativam respostas para evitar a desidratação de seus tecidos, enquanto o terceiro; que é a tolerância a seca, as plantas apresentam a capacidade de manter a homeostase celular, embora com baixos conteúdos de água em seus tecidos (LARCHER, 2000; VERSLUES et al., 2006).

Nesse sentido, as plantas sob condições de déficit hídrico desempenham várias respostas como a perda de turgor celular, diminuição do potencial hídrico foliar, fechamento

estomático, de forma gradativa, que reduz o fluxo transpiratório, em resposta à baixa disponibilidade hídrica na zona radicular (ZHANG et al., 1999; SICHER et al., 2012).

Por outro lado, essa resposta da regulação estomática afeta a assimilação de CO₂, diminuindo a produção e, conseqüentemente, a translocação de carboidratos (DAVIES et al., 2002; SILVA et al., 2003). Assim, o fechamento parcial ou total dos estômatos (DaMATTA et al., 1997; MENEZES-SILVA et al., 2017), causa limitações difusivas e bioquímicas (ARAUJO et al., 2008; BATISTA et al., 2012), prejudicando o aparato fotossintético (MENEZES-SILVA et al., 2017), aumentando o consumo das reservas energéticas (DaMATTA et al., 2018) para manutenção da homeostase celular. Deste modo, afeta diretamente o crescimento e o desenvolvimento da planta, limitando a produtividade (MENDES et al., 2017; MENEZES-SILVA et al., 2017).

Além desses efeitos, o déficit hídrico reduz a assimilação de nutrientes minerais, pois os mesmos são absorvidos pelas raízes e translocados dentro da planta de modo dependente do fluxo transpiratório (TAYLOR et al., 1982). Isso ocorre devido os nutrientes minerais serem absorvidos juntamente com a água (solução do solo), e com isso, a baixa disponibilidade hídrica no solo pode afetar a eficiência de absorção das raízes (SALIENDRA; MEINZER, 1992), pela limitação da transpiração causada pelo fechamento estomático, ocorrendo alteração na distribuição dos minerais dentro da planta. Como os elementos minerais são fundamentais para a produção de macromoléculas, como proteínas e aminoácidos, além de serem cofatores de enzimas de várias rotas biossintéticas, o desequilíbrio nutricional induz a limitação na produção de biomoléculas (HECKATHORN et al., 1997).

Outra resposta das plantas sob condições de déficit hídrico é o estímulo ao crescimento do sistema radicular, devido à remobilização de carboidratos, permitindo a absorção de água em camadas mais profundas do solo (SHARP, 2002; FITZ-GERALD et al., 2006), assim, podendo aumentar a relação raiz/parte aérea (SICHER et al., 2012).

Os cafeeiros podem ser diretamente afetados pelo déficit hídrico, principalmente na fase do transplante de mudas para o campo (MATIELLO et al., 2005). Essa é uma fase considerada crítica, podendo resultar em grandes perdas para o cafeicultor, pois promove um estresse no sistema radicular dessas plantas, necessitando de um período de aclimação ao campo, além de adequado suprimento de água (MATIELLO et al., 2005; SANTINATO; SILVA, 2001). Assim, se ocorrer um déficit hídrico nessa fase de aclimação, pode resultar

em queda de rendimento do cafezal (MATIELLO et al., 2005; SENAR, 2017), ou em casos mais severos, na mortalidade das mudas, sendo necessário o replantio.

No entanto, práticas agrícolas podem ser adotadas para atenuar os efeitos do estresse hídrico e manter o processo fotossintético ativo. Dentre elas, está a suplementação nutricional de forma foliar. Essa prática é um reforço à adubação química no solo, melhorando o aspecto nutricional da planta (FERNÁNDEZ et al., 2006). Dentre os nutrientes que podem ter efeitos positivos nesta prática, está o magnésio (Mg), um constituinte da molécula de clorofila e também cofator de várias enzimas fotossintéticas, como a formação do composto Mg-ATP, importante no ciclo de Calvin-Benson (BERARDI et al., 2014; GEIGER, 2011; CARDONA et al., 2018).

Já foi evidenciado que o Mg é importante na translocação de açúcares, atuando no transporte de sacarose, favorecendo a relação fonte-dreno da planta (CAKMAK et al., 1994; HERMANS et al., 2004; GEIGER, 2011; TRÄNKNERA et al., 2018) e que as plantas bem nutridas com Mg apresentam adequada partição de biomassa (CAKMAK et al., 1994; HERMANS; VERBRUGGEN, 2005). Por isso, manter essa produção e translocação de açúcares é importante para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (LIVRAMENTO et al., 2003; ROSA et al., 2009; ALVES et al., 2011), principalmente em condições de déficit hídrico.

Assim sendo, foi testada a hipótese de que cafeeiros suplementados com Mg foliar apresentam tolerância ao déficit hídrico devido à manutenção da atividade fotossintética para a produção e translocação de açúcares, além de estimular o acúmulo de carboidratos no sistema radicular, para o crescimento e desenvolvimento, assim como, melhor recuperação do status hídrico e do aparato fotossintético após reidratação. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi analisar se a suplementação de Mg foliar em mudas de cafeeiro sob déficit hídrico estimula a produção e translocação de açúcares, promovendo o acúmulo de carboidratos nas raízes, favorecendo o crescimento e o desenvolvimento nesta fase crítica para implantação da cultura cafeeira.

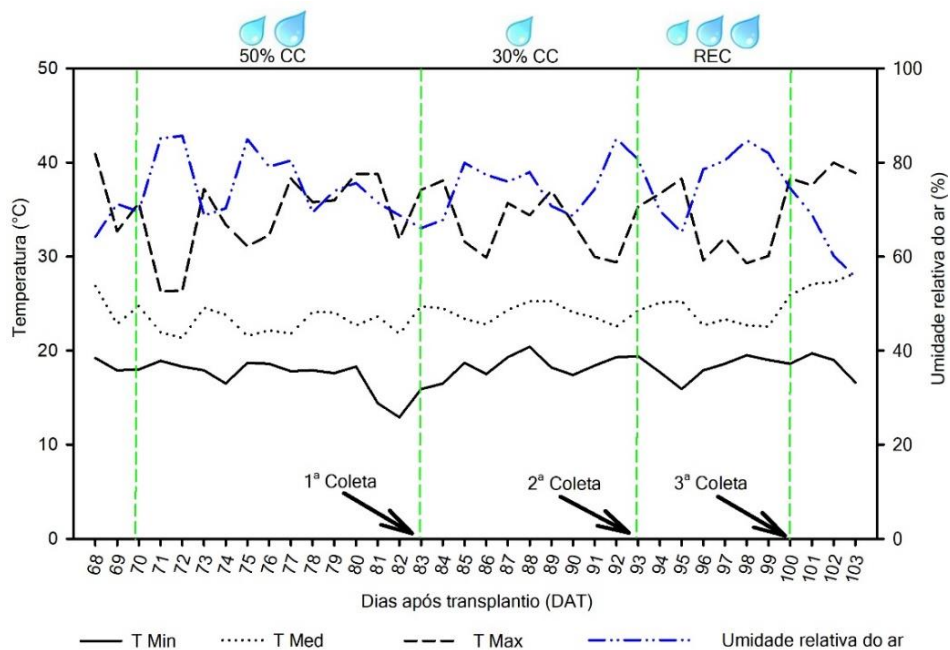
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condução experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Setor de Fisiologia Vegetal, do Departamento de Biologia (DBI), da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A região está localizada em 21°13'40" S e 44°57'50" O, com altitude de aproximadamente 900 m e clima do tipo Cwa (KÖPPEN, 1948), com características de Cwb, apresentando uma estação seca (abril a setembro) e outra chuvosa (outubro a março), com uma precipitação anual média de 1.530 mm (BRASIL, 1992).

Durante o período experimental a temperatura e a umidade relativa do ar (Figura 1) foram monitoradas utilizando um termohigrômetro digital com *datalogger* modelo HT-500 INSTRUTHERM®.

Figura 1 - Temperaturas mínima (T Min), média (T Med) e máxima (T Max) e umidade relativa do ar, durante os três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

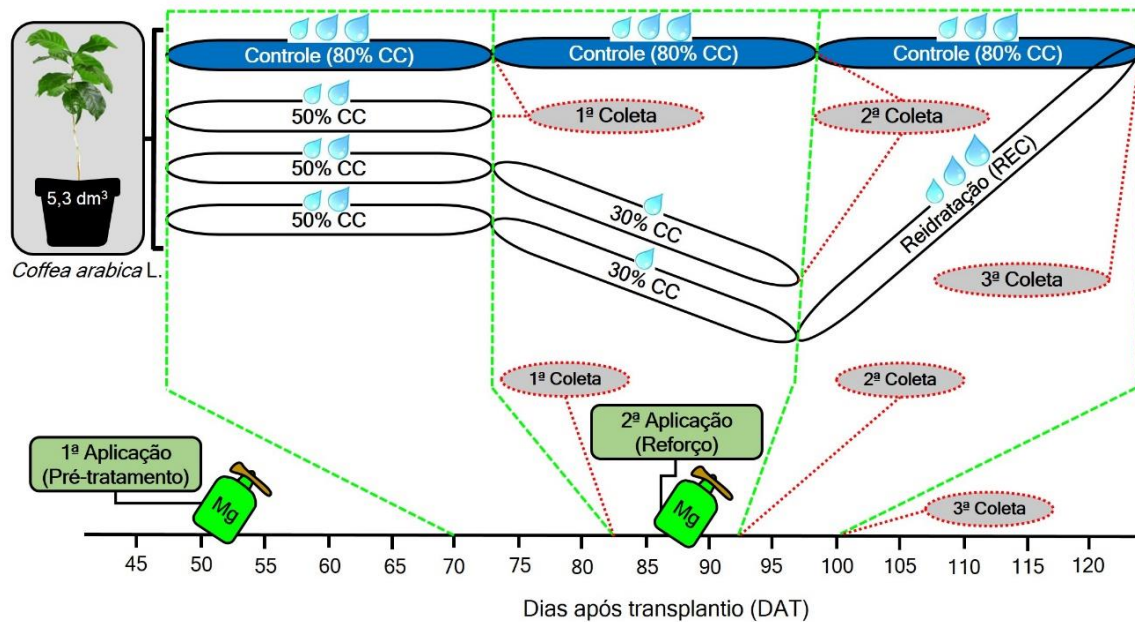


Fonte: do autor (2021).

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos completos casualizados, em esquema fatorial 2 x 2, com 6 repetições (uma planta por repetição), totalizando 24 unidades

experimentais. Essas unidades experimentais foram triplicadas para que fosse possível realizar três momentos de coletas destrutivas durante a avaliação experimental, definidos a partir da intensidade do estresse [50% e 30% da capacidade de campo (CC)] e a reidratação (REC) das plantas (Figuras 1 e 2). Os níveis do primeiro fator foram duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%), enquanto para o segundo fator foram duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)].

Figura 2 - Representação esquemática dos tratamentos de aplicação de Mg foliar e das condições hídrica, nos três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC). As coletas foram realizadas nos dias 83, 93 e 100 dias após o transplantio.



Fonte: do autor (2021).

Para condução do experimento foram utilizados vasos contendo 5,3 dm³ da mistura de solo + areia (2:1). Essa mistura foi realizada pelo fato de que o solo utilizado é muito argiloso e assim, poder facilitar a condução dos tratamentos de condições hídrica (Figura 2). Após a mistura (substrato homogêneo) foi coletada uma amostra e realizou-se análise química no Laboratório de Análise de Solo, Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Conforme o resultado da análise (Tabela 1, Anexo), foi realizada uma adubação química de cobertura, conforme recomendação de Malavolta (1980), utilizando o formulado NPK (4-14-8), sendo aplicado 2 g vaso⁻¹.

Para testar os tratamentos foram adquiridas mudas de *Coffea arabica* L., cultivar Mundo Novo IAC 376-4, caracterizado pelo alto vigor vegetativo e potencial produtivo (FAZUOLI et al., 2007), sendo um dos cultivares mais cultivados pelos cafeicultores nacionais (REHAGRO, 2020). As mudas com 3 meses de idade e 3 pares de folhas foram provenientes de um viveiro comercial de mudas, em Três Pontas, MG, produzidas em sacos plásticos, com substrato comercial. O transplântio das mudas para os vasos foi realizado 5 dias após o recebimento das mesmas, depois de um período de aclimação às condições da área experimental, quando emitiram 2 pares de folhas novas após o transplântio, sendo a unidade experimental uma planta por vaso.

Para o tratamento da aplicação do Mg foliar foi utilizado como fonte o $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Sinth - PA), aplicado na concentração de 2% (V/V). A primeira aplicação foi realizada aos 53 dias após o transplântio (DAT), antes da imposição do déficit hídrico, como uma preparação das plantas ao estresse (Pré-tratamento), enquanto que a segunda foi aos 89 DAT, como forma de suplementação (Reforço) para a recuperação após a reidratação (Figura 2), utilizando um pulverizador manual (5 Litros, Compressão Prévia; Palisad[®]). Junto com a solução de Mg foi adicionado óleo mineral na concentração de 0,01%, para a quebra da tensão superficial da água e aumentar a área de molhamento da folha, sendo aplicadas até o ponto de escorrimento (MONTÓRIO et al., 2005; MARTINS et al., 2010). Para garantir que todas as folhas recebessem os tratamentos, foi realizada aplicação tanto na superfície abaxial e quanto adaxial das folhas (FERNÁNDEZ et al., 2006). No dia de cada aplicação as plantas foram separadas em dois lotes, para evitar o contato das plantas controle (Mg0%) ao Mg, as quais, foi realizada uma aplicação foliar com água destilada, sendo adicionado o óleo mineral na mesma concentração.

A quantidade de água da irrigação foi controlada utilizando um sensor de umidade do solo (ThetaProbe, tipo ML2x, Delta-T Devices[®]) para monitorar a umidade do solo. Esse sensor foi conectado ao computador, utilizando o software DeltaLINK[®], versão 3.8.2. Inicialmente foi realizada uma curva de calibração (Equação 1) para determinar a capacidade de retenção de água do solo (CC). Com a curva de calibração definida foram conduzidos os tratamentos de condições hídricas, repondo a cada dois dias, a quantidade de água no vaso com uma proveta graduada em mm, necessária para manter a umidade solo desejada (Figuras 1 e 2).

$$\text{Volume de água (mL)} = 104.23 * e^{7.5192 * \text{voltagem (m}^3 \text{ m}^{-3})}; R^2 = 0.9804^{**} \quad \text{eq. 1}$$

O tempo de cada coleta, nos três momentos de avaliação da intensidade do estresse (50% e 30% da CC e REC) (Figura 2), foi determinado através do monitoramento da assimilação de CO₂ (A) e condutância estomática (gs), indicando que as plantas estavam sob déficit hídrico (valores muito baixos), nos períodos de estresse, ou haviam se recuperado do mesmo (valores normais), no caso de REC.

2.2 Características analisadas

Na primeira coleta (50% CC), foram realizadas duas análises de assimilação de CO₂ (A), considerando todas as folhas do dossel vegetativo (fotossíntese da planta inteira), sendo a primeira análise realizada aos 62 DAT, antes da imposição dos tratamentos de condição hídrica, estando apenas com os tratamentos de aplicação de Mg foliar, enquanto a segunda, foi aos 77 DAT, após as plantas já estarem sob as condições hídrica estudadas. Para isso, foi utilizado um analisador de gases por infravermelho (SBA-5, PP Systems, EUA), considerando um sistema fechado. A mensuração de A foi realizada de acordo com o método de Sestak et al. (1971), descrito em Mitchell (1992).

Foi construída uma câmara para encarcerar a planta com estrutura em ferro e revestida com plástico transparente (dimensões 63 x 24 cm) de modo que a câmara encaixava na superfície do vaso (Figura A1). O analisador de gases por infravermelho puxava o ar de dentro da câmara através de uma mangueira acoplada a um conector na câmara. Todas as frestas foram corretamente vedadas para evitar vazamentos de ar, sendo o ar dentro da câmara renovado após a leitura, para poder iniciar a leitura na planta seguinte. O volume da câmara e o encanamento associado eram conhecidos e a medição foram eficientes para minimizar os efeitos da mudança de temperatura e/ou concentração de CO₂ na taxa de troca de gás.

O SBA-5 contém uma fonte conectada à energia elétrica, recebe a mangueira de conexão do sistema fechado e envia informação da concentração de CO₂, água, temperatura do ar e da água e pressão de vapor dentro do sistema fechado, para o computador, utilizando o software GAS[®], versão 3.11. Após toda a vedação do sistema, essas análises eram realizadas por um período de 3 minutos, suficiente para observar o decréscimo linear na concentração de

CO₂ dentro da câmara, sendo que, para os cálculos, foram desconsiderados os resultados do primeiro minuto de leitura, como tempo de aclimação.

A partir disso, foi utilizada seguinte equação para calcular a assimilação de CO₂ em sistema fechado (SESTAK et al., 1971):

$$A = \frac{C_1 - C_2}{T_1 - T_2} \times V \times \frac{1}{L} \quad \text{eq. 2}$$

Onde:

A = assimilação de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹);

C₁ e C₂ = concentração de CO₂ (ppm) nos tempos T1 e T2;

V = volume total do sistema (m³);

L = área foliar (m²).

Foi realizada a correção da taxa fotossintética medida para temperatura e pressão padrão (0 °C ou 273K e 1 atm ou 0,1013 MPa) (MITCHELL, 1992).

A transpiração foliar foi calculada pela equação:

$$E = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} \times V \times \frac{1}{L} \quad \text{eq. 3}$$

Em que:

E = transpiração (mmol m⁻² s⁻¹);

H₁ e H₂ = Concentração de água no ar dentro da câmara, inicial e final (mmol), respectivamente;

T₁ e T₂ = Tempo de leitura inicial e final (s), respectivamente.

A partir desses resultados foi analisada a eficiência do uso da água (EUA):

EUA = A/E (μmol mmol⁻¹)

No período de 30% da CC, aos 84 DAT, foi realizada uma análise de trocas gasosas [assimilação de CO₂ (A, μmol m⁻² s⁻¹), condutância estomática (g_s, mol m⁻² s⁻¹), transpiração (E, mmol m⁻² s⁻¹) e concentração intercelular de CO₂ (C_i, μmol mol⁻¹)], com um analisador de gases por infravermelho de fluxo aberto (IRGA) (Li-6400XT, LI-COR, EUA).

Já no período da reidratação (REC), aos 97 DAT esta análise foi realizada com o IRGA Li-6800XT (LI-COR, EUA). Nesses dois períodos de coleta, com os dados de A , g_s e C_i foram calculados a eficiência intrínseca do uso de água ($EUA_i = A/g_s$) e a eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i).

Como as avaliações de fotossíntese foram realizadas com equipamentos e condições de medidas distintos, devido a disponibilidade dos equipamentos durante o período experimental, não foi realizada a comparação desses parâmetros entre os diferentes momentos de medidas. As comparações foram realizadas apenas entre os tratamentos em cada momento de medida.

As análises de fotossíntese (sistema aberto), com os dois IRGA (Li-6400XT e Li-6800XT), foram realizadas na primeira folha totalmente expandida, sob densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Q) de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ e temperatura do ar de 25°C .

Juntamente com a análise de trocas gasosas, em REC, foi monitorada a fluorescência da clorofila a , através dos parâmetros que são medidos com o IRGA Li-6800XT, onde foram analisados a eficiência quântica efetiva do fotossistema II ($\Delta F/F_m' = (F_m' - F_s)/F_m'$), o coeficiente de extinção fotoquímico [$q_P = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o')$] e a taxa de transporte aparente de elétrons [$ETR = (Q * \Delta F/F_m' * 0,5 * 0,84)$] (ROHÁČEK, 2002), na qual os fatores 0,5 e 0,84 representam a fração de excitação distribuída para o FSII e fração de luz absorvida, respectivamente; o F_m' e F_s são fluorescência máxima e no estado de equilíbrio dinâmico, respectivamente, em tecidos iluminados e F_o' é a fluorescência basal após excitação do fotossistema I (FSI) por radiação infra-vermelha (BJÖRKMAN; DEMMIG, 1987; KONRAD et al., 2005). Com dados obtidos, foi analisada a relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO_2 (ETR/A).

Todas as avaliações de trocas gasosas (sistema fechado e aberto) foram realizadas pelo período da manhã, entre 9h00 e 12h00, com a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) da área monitorada utilizando um quantômetro (Li-190, LI-COR, EUA). Durante o período de medidas a área experimental apresentou um PAR médio de $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com picos máximos de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sob fotoperíodo de 12 h.

Utilizou-se o medidor portátil (atLEAF®, CHL Plus, EUA) para mensurar o conteúdo relativo de clorofila e foi convertido em índice SPAD, conforme Zhu et al. (2012). Realizaram-se análises do potencial hídrico foliar (Ψ_w) em folhas totalmente expandidas com

auxílio de uma câmara de pressão (modelo 1000, PMS *Instruments Company*, EUA) (SCHOLANDER et al., 1965). As leituras foram realizadas na tarde (12h00) anterior e na antemãnhã (04h00) do dia de cada coleta (CHONÉ et al., 2001).

O conteúdo relativo de água (CRA) das folhas em cada coleta foi determinado, conforme Barr e Weatherley (1962). Para isto, foram coletados 5 discos, com 6 mm de diâmetro cada, de folhas totalmente expandidas, por tratamento, em sacos plásticos e armazenados em caixa de isopor com gelo para manter o turgor celular. Em seguida, foram levados ao Laboratório de Bioquímica e Fisiologia Molecular de Plantas (LBFMP) da UFLA e pesados em balança analítica de precisão, para obtenção da massa fresca (MF). Posteriormente, foram colocados em placas de Petri com papel filtro saturado com água destilada, por um período de 24 horas, sendo novamente pesados, para obtenção da massa túrgida (MT). Por último, foi obtida a massa seca (MS), após secagem em estufa de circulação de ar forçada (65 °C), até atingir peso constante. Dessa forma, os valores obtidos nestas pesagens, foram utilizados na seguinte equação:

$$\text{CRA (\%)} = \frac{\text{MF} - \text{MS}}{\text{MT} - \text{MS}} \times 100 \quad \text{eq. 4}$$

Como foi utilizado o sensor de umidade do solo para controlar a irrigação em todos os vasos, a quantidade de água utilizada foi quantificada em todo o período experimental, sendo possível obter os valores do consumo de água diário e total.

Para a verificar a influência dos tratamentos na relação fonte-dreno das plantas, amostras de folha velha (FV), que eram folhas totalmente expandidas e desenvolvidas após a aplicação dos tratamentos; folha nova (FN), que eram folhas menores, em desenvolvimento, também emitidas após os tratamentos; e raiz (R), foram trituradas em moinho de Facas, Tipo Willey para quantificação da concentração de carboidratos ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MS), considerando os açúcares solúveis totais (AST), açúcares redutores (AR), sacarose (SAC) e amido. No processo de extração desses carboidratos, 0,2 g de MS foi adicionada em 5 mL de tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 7,0), passando por banho-maria por 30 min a 40 °C, seguido de centrifugação à 10.000 g por 20 min, sendo coletado o sobrenadante (ZANANDREA et al., 2010).

A quantificação de AST foi pelo método da Antrona, conforme Yemm e Willis (1954), onde o reagente Antrona foi preparado adicionando 40 mg da mesma à 1 mL de água

destilada, seguida pela adição de 20 mL de H₂SO₄ concentrado. Primeiramente, foi obtida uma curva padrão, adicionando em tubos de ensaio, glicose (60 µg mL⁻¹) e água destilada à 2 mL do reagente Antrona, totalizando um volume final de 3 mL. Em seguida, os tubos foram colocados em banho-maria à 100 °C por 3 minutos, sendo posteriormente, realizada a leitura em espectrofotômetro à 620 nm. Após a obtenção da alíquota foram realizadas as leituras das amostras com o mesmo procedimento anterior, sendo adicionado a amostra ao invés da glicose.

Para a quantificação de AR, foi utilizado o método do Ácido Dinitrosalicílico (DNS), descrito por Miller (1959). O reagente foi preparado com a adição de 50 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 2N a 2,5 g de DNS e aproximadamente 125 mL de água destilada, com agitação até à dissolução. Em seguida foi adicionado 75 g de tartarato duplo de sódio e potássio (Sal de Rochelle), completando o volume da solução para 250 mL. A curva padrão foi obtida com a adição de 0,5 mL do reagente DNS à glicose e água destilada, em tubos de ensaio, agitando a mistura e passou pelo banho-maria a 100 °C por 5 min. Após esfriar em temperatura ambiente, o volume reacional foi completado para 5 mL com água destilada e a leitura foi realizada no espectrofotômetro à 540 nm. A leitura das amostras foi realizada após a obtenção da alíquota, com o mesmo procedimento anterior, com a adição da amostra ao invés da glicose.

A concentração de SAC foi estimada através da diferença entre as concentrações de AST e AR. Já para o amido, após o processo de extração dos carboidratos, descrito anteriormente, o pellet foi ressuspendido com 8 mL do tampão acetato de potássio (200 mM, pH 4,8), sendo que, para sua extração foi adicionado 2 mL da enzima amiloglucosidase (1 mg/mL) [1 mL da enzima em 1 mL do tampão acetato de potássio (200 mM, pH 4,8)]; passou pela incubação em banho-maria a 40 °C por 2 horas, foi centrifugado a 10.000 g por 20 minutos e o sobrenadante foi coletado. O amido foi quantificado pelo método da Antrona.

Foram realizadas análises biométricas: altura da planta, cm (com régua graduada); diâmetro do caule, mm (com paquímetro digital); número de folhas; comprimento de ramos plagiotrópicos, cm (com régua graduada); área foliar, m² [com régua graduada, através da relação comprimento x largura, aplicando-se o fator de correção de 0,667 (BARROS et al., 1973)]; e massa foliar específica, g m⁻², para verificar a influência dos tratamentos no crescimento das plantas. Além disso, ao final de cada coleta foi determinada a partição de matéria seca [parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST = MSPA + MSR)], onde as

amostras foram colocadas para secar em estufa de circulação de ar forçado a aproximadamente 65 °C, até atingir massa constante. Com esses dados foi determinada a relação raiz/parte aérea (R/PA).

Com a massa seca (MS) da raiz e total foi calculado o índice de tolerância ao estresse (ITS) na primeira e segunda coletas (50% e 30% CC), através da seguinte equação:

$$\text{ITS (\%)} = \frac{\text{Produção de MS sob déficit hídrico}}{\text{Produção de MS no controle (Hidratado)}} \times 100 \quad \text{eq. 5}$$

Após o material seco e moído, amostras de folhas totalmente expandidas (FV), que receberam os tratamentos com Mg, após o período da reidratação (REC), foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solo e Foliar (RIBERSOLO), Ribeirão Preto, SP, para determinar o teor de N, P, K, Ca e Mg. Com esses resultados, foi calculado o acúmulo desses nutrientes na folha, fazendo a relação com os dados de massa seca foliar, para verificar se ocorreu efeito de diluição do nutriente. A partir dos dados de MSPA e acúmulo de nutrientes na folha foi calculada a eficiência no uso do nutriente (EUN, g mg⁻¹), conforme Moll et al. (1982):

$$\text{EUN} = \frac{\text{MSPA}}{\text{Acúmulo do nutriente na folha}} \quad \text{eq. 6}$$

2.3 Análise estatística

Todas as análises estatísticas (uni e multivariada), foram realizadas utilizando a plataforma R versão 4.0.5. Os dados obtidos foram submetidos a testes de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett, $p \geq 0,05$) e normalidade (Shapiro-Wilk, $p \geq 0,05$), utilizando o pacote car (FOX; WEISBERG, 2019), para verificar se seguem distribuição normal (Tabelas 2 a 6, Anexo). Para os dados que não apresentaram distribuição normal foram realizadas transformações dos mesmos (Tabelas 7 e 8, Anexo). A partir disso, ainda não apresentando normalidade, foi realizada uma análise não-paramétrica, utilizando o teste Kruskal-Wallis para verificar se houve diferença significativa entre os tratamentos e o teste Dunn, pelo método de Bonferroni, para fazer a comparação de médias, com os pacotes PMCMRplus (POHLERT, 2020) e FSA (OGLE et al., 2020).

Para os dados que apresentaram distribuição normal foi realizada uma análise de variância (Teste F, $p \leq 0,05$) e as médias foram comparadas utilizando-se o teste Tukey ($p \leq$

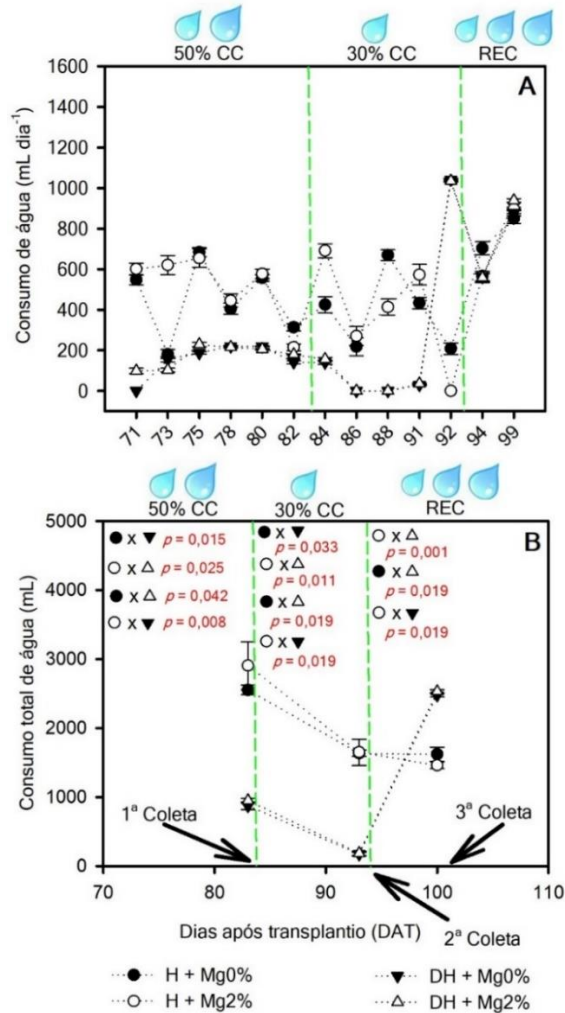
0,05), usando o pacote agricolae (MENDIBURU, 2021), com a função TukeyHSD. Além disso, foi realizada uma análise de correlação de todos os dados (Figuras A2 a A4), com o pacote corrplot (WEI; SIMKO, 2017). A partir disso, foram selecionadas as variáveis que apresentaram mais correlações positivas ($p \leq 0,05$) e foi realizada uma análise de componentes principais (PCA), com o pacote ggfortify (TANG; HORIKOSHI, 2016), na função prcomp, para analisar o efeito dos tratamentos.

3 RESULTADOS

3.1 Consumo de água e status hídrico

Durante a condução experimental as plantas responderam aos tratamentos de condição hídrica. De forma específica, as plantas H + Mg2% consumiram mais água diariamente, como pode ser visualizado aos 73, 84 e 91 DAT (Figura 3A). No entanto, não houve diferença significativa para o consumo total de água entre as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, durante os três momentos de avaliação [50% CC, 30% CC e REC] (Figura 3B). De outra forma, as plantas H + Mg0% e H + Mg2% apresentaram o maior consumo de água, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, nos momentos de avaliação de 50% CC e 30% CC. Porém, no momento de REC, ocorreu o resultado inverso, onde as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% apresentaram maior consumo de água.

Figura 3 - Consumo de água diário (A) e total (B), de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

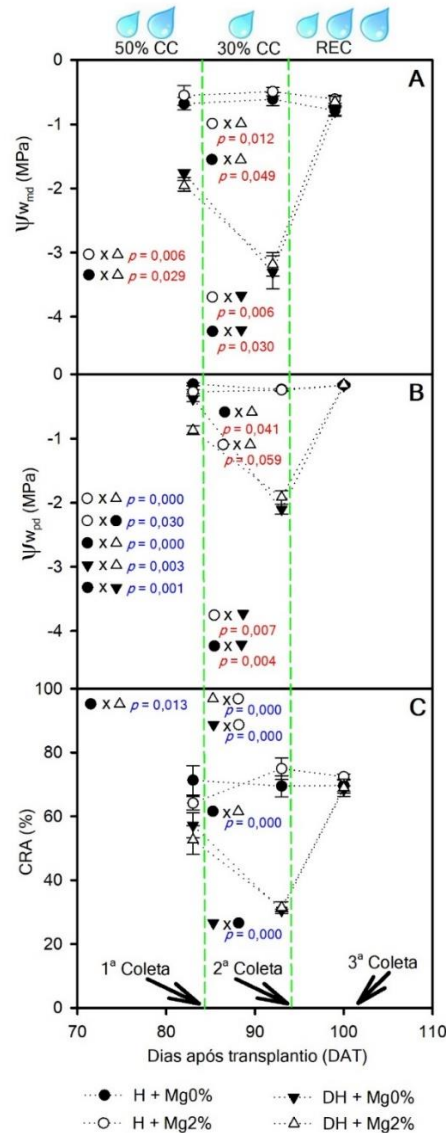


O valor de p (Dunn, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

No primeiro momento de avaliação (50% CC), houve redução significativa do $\Psi_{w_{md}}$ das plantas DH + Mg2%, diferindo das plantas H + Mg0% e H + Mg2%, respectivamente (Figura 4A). Nesse mesmo momento de avaliação da intensidade do estresse, as plantas DH + Mg2% apresentaram redução significativa do $\Psi_{w_{pd}}$, diferindo dos demais tratamentos (Figura 4B). Houve redução significativa do CRA das plantas DH + Mg2%, quando comparadas com as plantas H + Mg0% (Figura 4C).

Figura 4 - Potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$) [A] e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$) [B] e conteúdo relativo de água (CRA) [C] de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



O valor de p [Dunn (vermelho) e Tukey (azul), $p \leq 0,05$] é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

No momento de avaliação do estresse de 30% CC, houve diferença significativa apenas entre as condições hídricas, onde as plantas H + Mg0% e H + Mg2%, apresentaram os maiores valores para o $\Psi_{w_{md}}$, $\Psi_{w_{pd}}$ e CRA, respectivamente, quando comparadas com as

plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 4A, B e C). De outra forma, no momento de REC não houve diferença significativa entre os tratamentos.

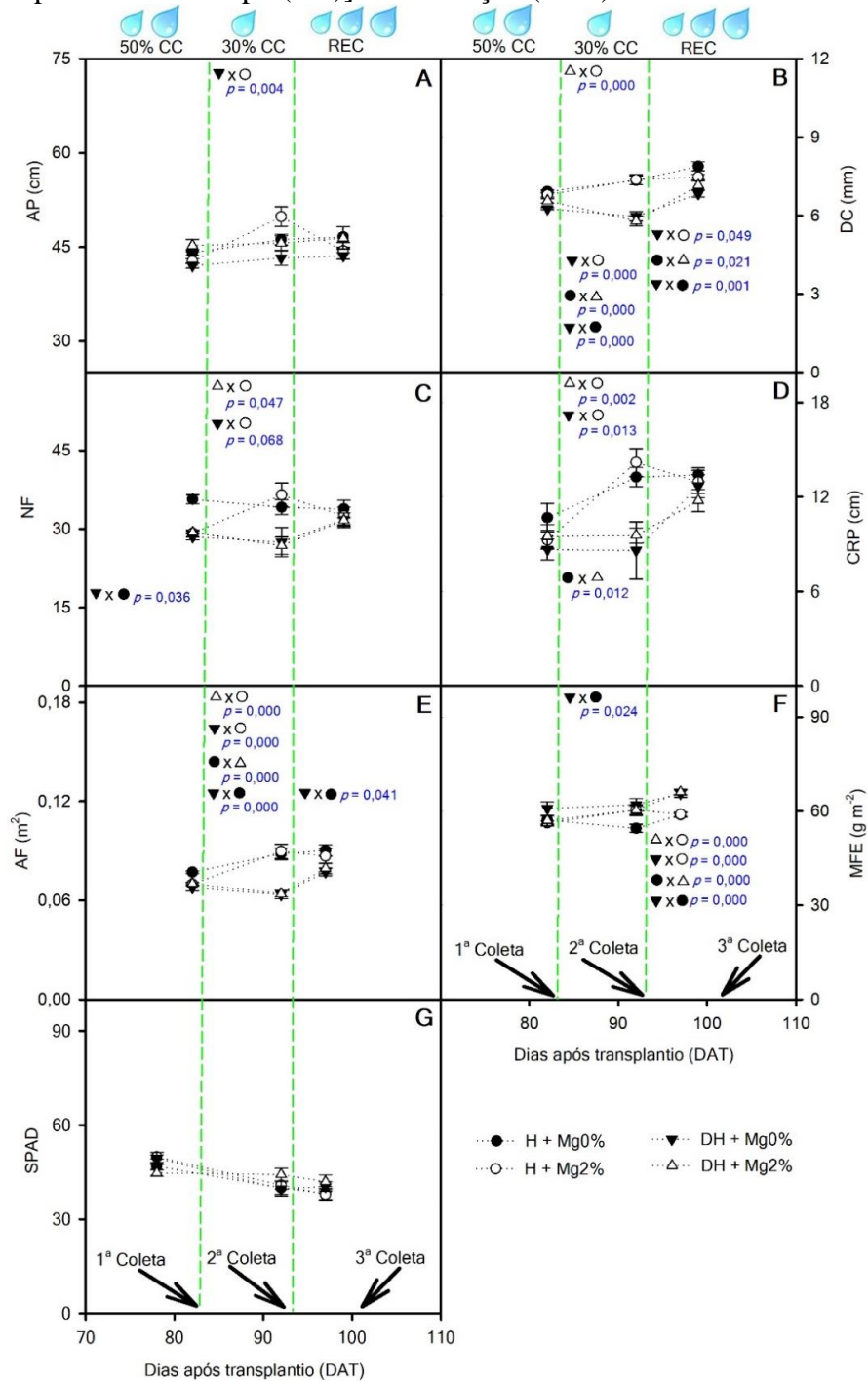
3.2 Crescimento das plantas

Quanto às características de crescimento das plantas, no momento de 50% CC, não houve diferença significativa entre os tratamentos para a AP, DC, CRP, AF, MFE e SPAD (Figura 5A, B, D, E, F e G). Porém, com a elevação da intensidade do estresse (30% CC), foi verificada diferença significativa entre condições hídricas, na qual, as plantas H + Mg0% e H + Mg2% apresentaram os maiores valores de DC e AF, quando comparadas com as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 5B e E). Além disso, as plantas H + Mg2% apresentaram os maiores valores de AP diferindo significativamente, apenas das plantas DH + Mg0% (Figura 5A). De outro modo, as plantas DH + Mg2% apresentaram AP semelhante as plantas H + Mg2%.

Para o NF e CRP, as plantas H + Mg2% apresentaram os maiores valores dessas características, quando comparadas com as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 5C e D). Nesse mesmo momento de avaliação, as plantas H + Mg0% apresentaram maior CRP, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 5D). De forma inversa, as plantas DH + Mg0% apresentaram maior MFE quando comparadas com as plantas H + Mg0% (Figura 5F). Além disso, ainda nesse momento de avaliação, as plantas DH + Mg2% apresentaram valores de MFE igual as plantas controle (H + Mg2%).

No período de reidratação (REC), as plantas H + Mg0% obtiveram maior DC, havendo diferença significativa das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 5B). Nessa mesma condição, as plantas H + Mg2% diferiram significativamente das plantas DH + Mg2%. No entanto, para a MFE, as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% apresentaram os maiores valores dessa característica, diferindo significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2% (Figura 5F). De outra forma, quando reidratadas, as plantas não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos testados para AP, NF, CRP e SPAD (Figura 5A, C, D e G).

Figura 5 - Altura de planta (AP) [A], diâmetro do caule (DC) [B], número de folhas (NF) [C] e comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP) [E], área foliar (AF) [E], massa foliar específica (MFE) [F] e índice SPAD (SPAD) [G], de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

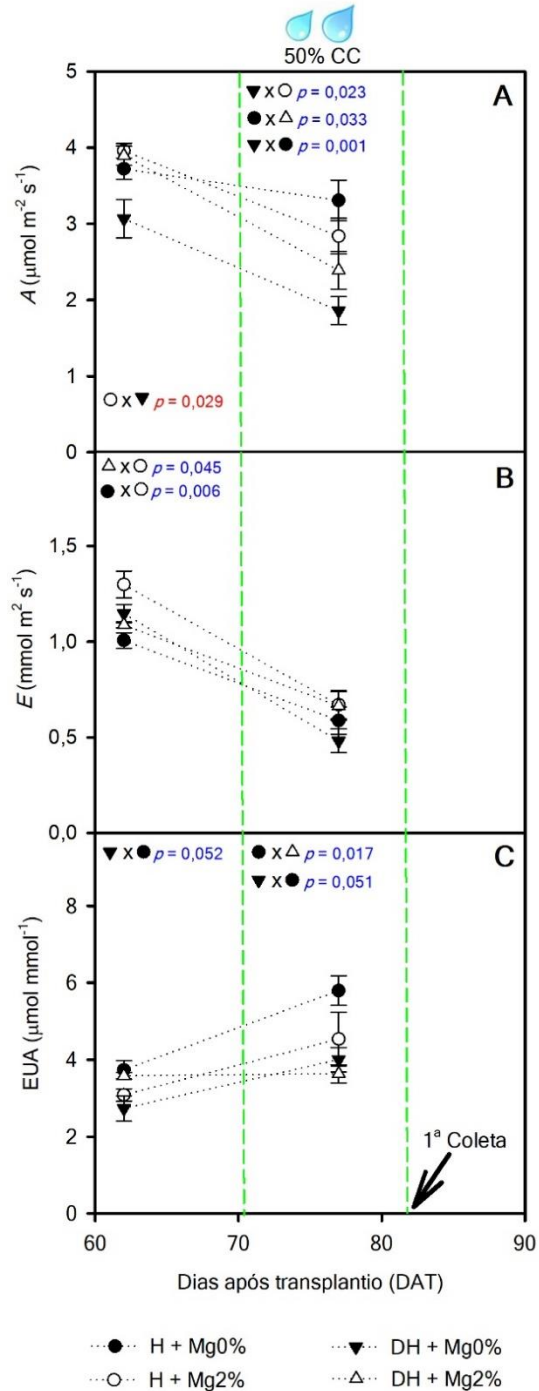
3.3 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*

Em relação às análises de trocas gasosas, antes do início dos tratamentos das condições hídricas (50% CC), haviam recebido apenas os tratamentos de Mg foliar, as plantas que receberam a suplementação com Mg foliar (H + Mg2% e DH + Mg2%) apresentaram os maiores valores de *A*, sendo que, as plantas H + Mg2% diferiram significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 6A). Além disso, as plantas H + Mg2% apresentaram maior *E*, diferindo significativamente das plantas DH + Mg2% e H + Mg0%, respectivamente (Figura 6B). Já para a EUA houve diferença significativa para as plantas H + Mg0%, sendo superior as plantas DH + Mg0% (Figura 6C). Porém, as plantas DH + Mg2% mantiveram a EUA semelhante as plantas H + Mg0%.

Por outro lado, ao iniciar o tratamento de condição hídrica (50% CC), as plantas H + Mg0% apresentara os maiores valores de *A*, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, respectivamente (Figura 6A). Além disso, as plantas H + Mg2% também diferiram significativamente das plantas DH + Mg0%, com superiores valores de *A*. No entanto, as plantas DH + Mg2% foram semelhantes às plantas H + Mg2%, mantendo os valores de *A*, mesmo em condições de déficit hídrico.

Nessa condição de déficit hídrico (50% CC), não houve diferença significativa entre os tratamentos para *E* (Figura 6B). No entanto, as plantas H + Mg0% apresentaram maior EUA, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, respectivamente (Figura 6C).

Figura 6 - Assimilação de CO₂ (A) [A], transpiração (E) [B] e eficiência do uso da água (EUA) [C] considerando todas as folhas do dossel vegetativo, antes e após déficit hídrico, de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], durante o primeiro momento de avaliação, definido a partir da intensidade do estresse [50% da capacidade de campo (CC)].

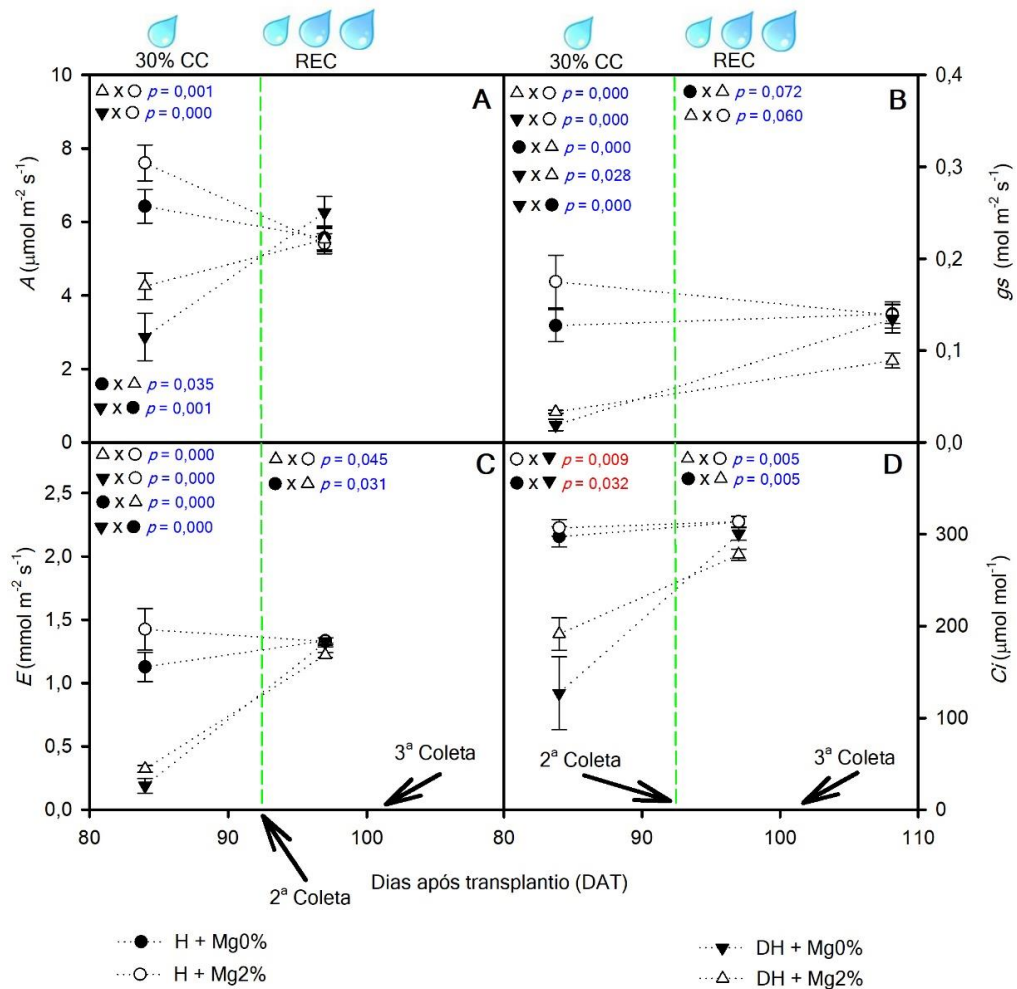


O valor de p [Dunn (vermelho) e Tukey (azul), $p \leq 0,05$] é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

No momento de avaliação do estresse de 30% CC, as plantas H + Mg0% e H + Mg2% apresentaram os maiores valores de A , g_s e E , diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 7A, B e C). Porém, as plantas DH + Mg2% apresentaram maiores valores de g_s , dentro dessa condição hídrica, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 7B). Para o C_i , as plantas H + Mg0% e H + Mg2% também apresentaram os maiores valores, porém diferiram significativamente apenas das plantas DH + Mg0% (Figura 7D).

Figura 7 - Assimilação de CO₂ (A) [A], condutância estomática (g_s) [B], transpiração (E) [C] e concentração interna de CO₂ (C_i) [D] de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



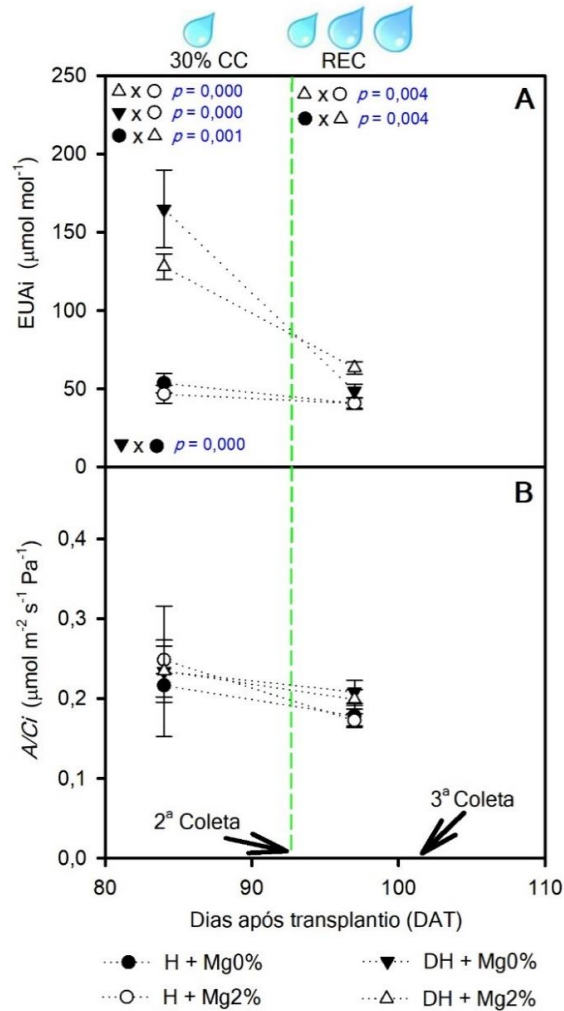
O valor de p [Dunn (vermelho) e Tukey (azul), $p \leq 0,05$] é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

Por outro lado, quando ocorreu a reidratação das plantas (REC), não houve diferença significativa entre os tratamentos para A (Figura 7A). De outra forma, as plantas H + Mg0% e H + Mg2%, apresentaram os maiores valores de g_s , E e C_i , diferindo significativamente das plantas DH + Mg2% (Figura 7B, C e D).

No momento de 30% CC, as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% apresentaram maior EUAi, diferindo significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2% (Figura 8A). Porém, após a reidratação das plantas (REC), as plantas DH + Mg2% resultaram em maior EUAi, diferenciando-se significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2%. Para A/C_i não houve diferença significativa entre os tratamentos durante o momento de 50% CC e após REC (Figura 8B).

Figura 8 - Eficiência intrínseca do uso de água (EUAi) [A] e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) [B] de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



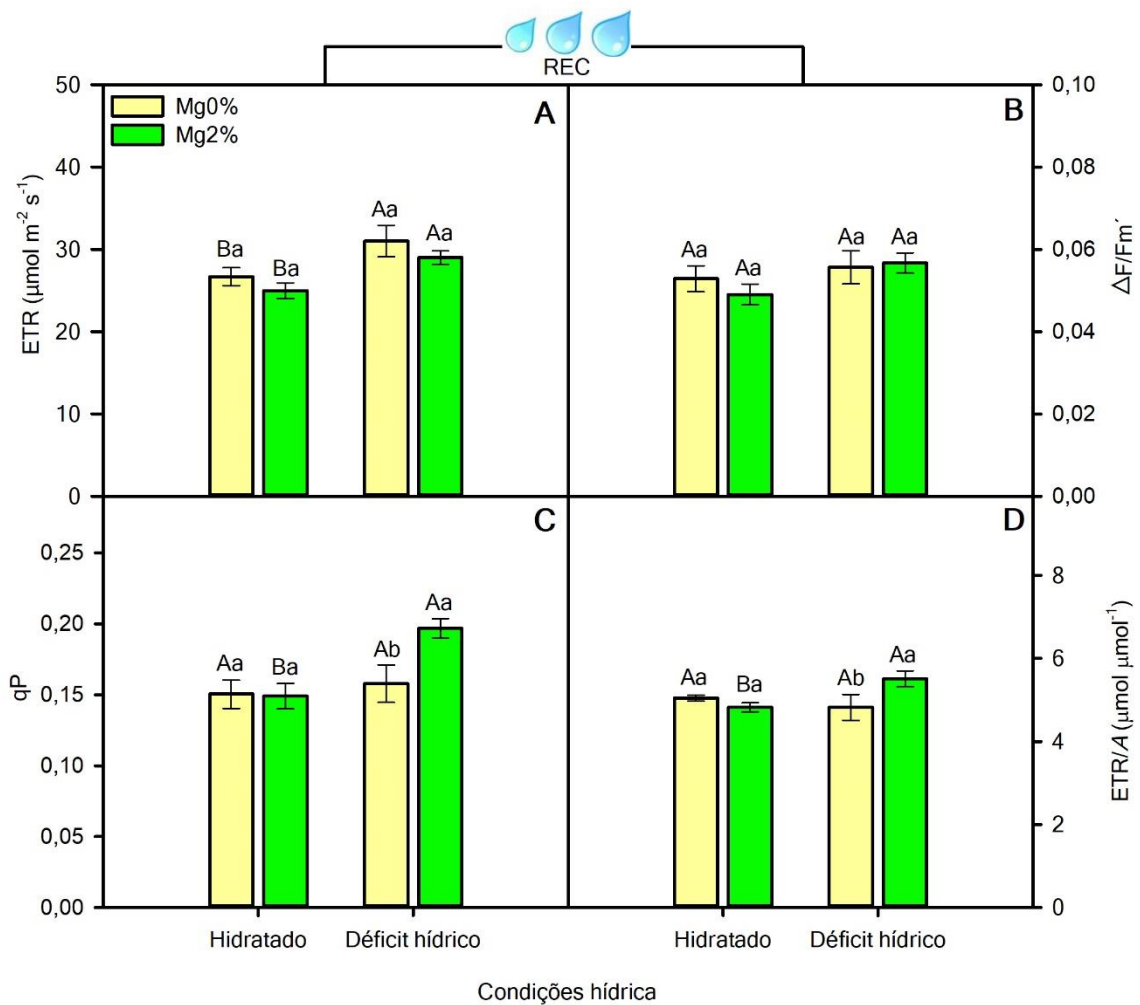
O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

Em relação aos resultados da fluorescência da clorofila a após a reidratação (REC), para a ETR, as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% apresentaram os maiores valores médios, diferindo significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2%, respectivamente (Figura 9A). Por outro lado, não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos para a $\Delta F/F_m'$ (Figura 9B). As plantas DH + Mg2% apresentaram maior qP e ETR/A, sendo superior significativamente, as plantas DH + Mg0% e H + Mg2%, respectivamente (Figura 9C e D).

Ainda sobre essas características, não houve diferença significativa entre as plantas H + Mg0% e DH + Mg0%.

Figura 9 - Taxa aparente de transporte de elétrons (ETR) [A], eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/F_m'$) [B], coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP) [C] e relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A) [D], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).



As letras minúsculas comparam as suplementações de Mg foliar e as maiúsculas comparam as condições hídrica (Tukey, $p \leq 0,05$). As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

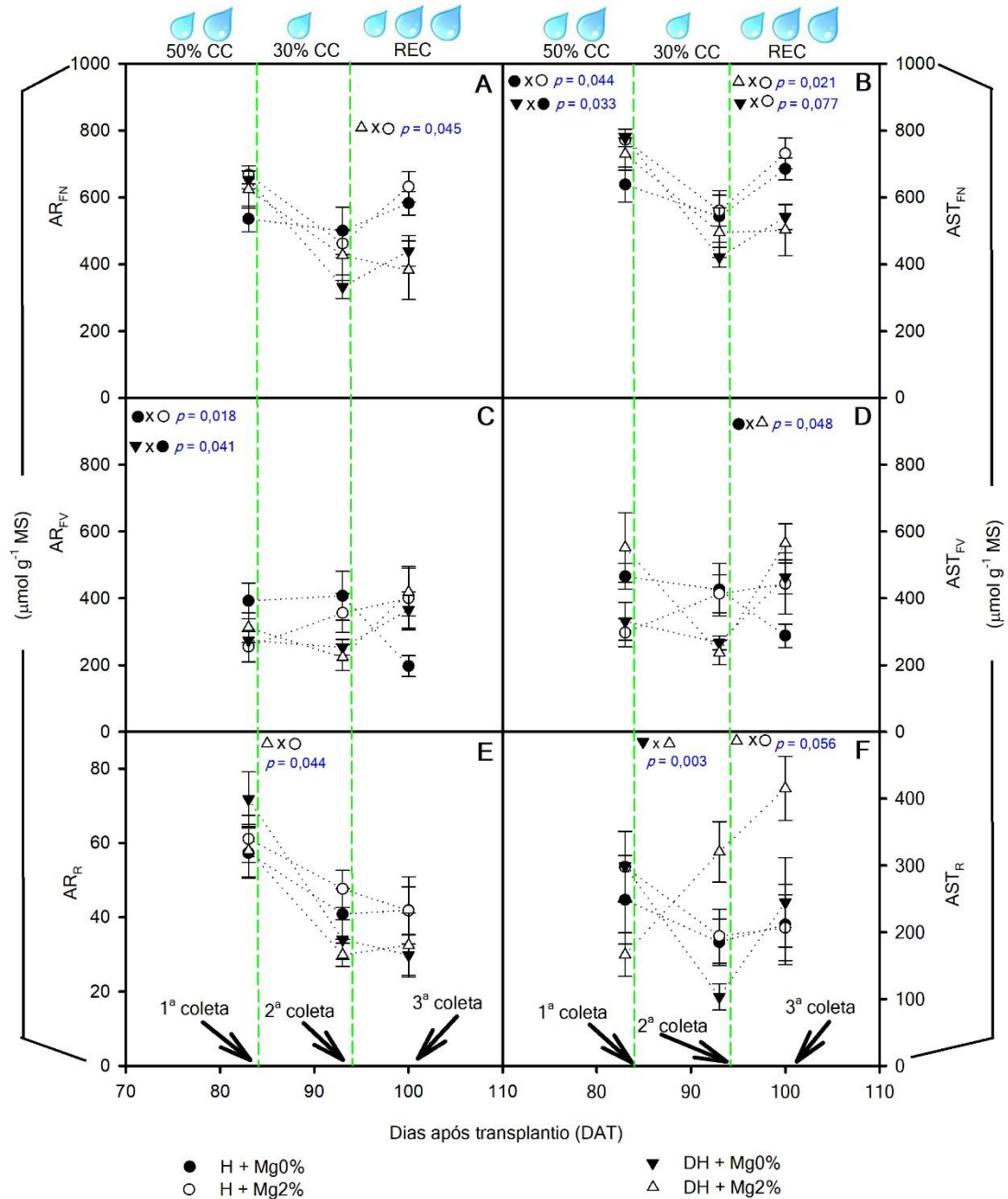
3.4 Acúmulo de carboidratos

Na primeira coleta (50% CC), as plantas H + Mg2% apresentaram maior concentração de AST_{FN} , diferindo significativamente das plantas H + Mg0% (Figura 10B). Além disso, as plantas DH + Mg0% apresentaram mais AST_{FN} , também apresentando diferença significativa das plantas H + Mg0%. As plantas H + Mg0% acumularam mais AR_{FV} , apresentando diferença significativa para as plantas H + Mg2% e DH + Mg0% (Figura 10C). Nessa mesma coleta, não houve diferença significativa entre os tratamentos para AR_{FN} , AST_{FV} e AR_R e AST_R , respectivamente (Figura 10A, D, E e F). Porém, as plantas DH + Mg2% apresentaram maior acúmulo de AST_{FV} , sendo semelhante as plantas H + Mg0% (Figura 10D).

Na segunda coleta (30% CC), não houve diferença significativa entre os tratamentos para AR_{FN} , AR_{FV} , AST_{FN} e AST_{FV} (Figura 10A, B, C e D). No entanto, as plantas DH + Mg2% apresentaram menor acúmulo de AR_R , diferindo significativamente das plantas H + Mg2% (Figura 10E). De outra forma, as plantas DH + Mg2% apresentaram maior acúmulo de AST_R , diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 10B).

Já na terceira coleta (REC), as plantas H + Mg2% apresentaram maior acúmulo de AR_{FN} e AST_{FN} , diferenciando-se significativamente das plantas DH + Mg2% (Figura 10A e B). Para AR_{FV} e AR_R não houve diferença significativa entre os tratamentos testados (Figura 10C e E). No entanto, as plantas DH + Mg2% apresentaram maior acúmulo de AST_{FV} e AST_R , diferindo significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2%, respectivamente (Figura 10D e F).

Figura 10 - Açúcares redutores (AR) [A, C e E] e solúveis totais (AST) [B, D e F] em folha nova (FN), folha velha (FV) e raiz (R), respectivamente, de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

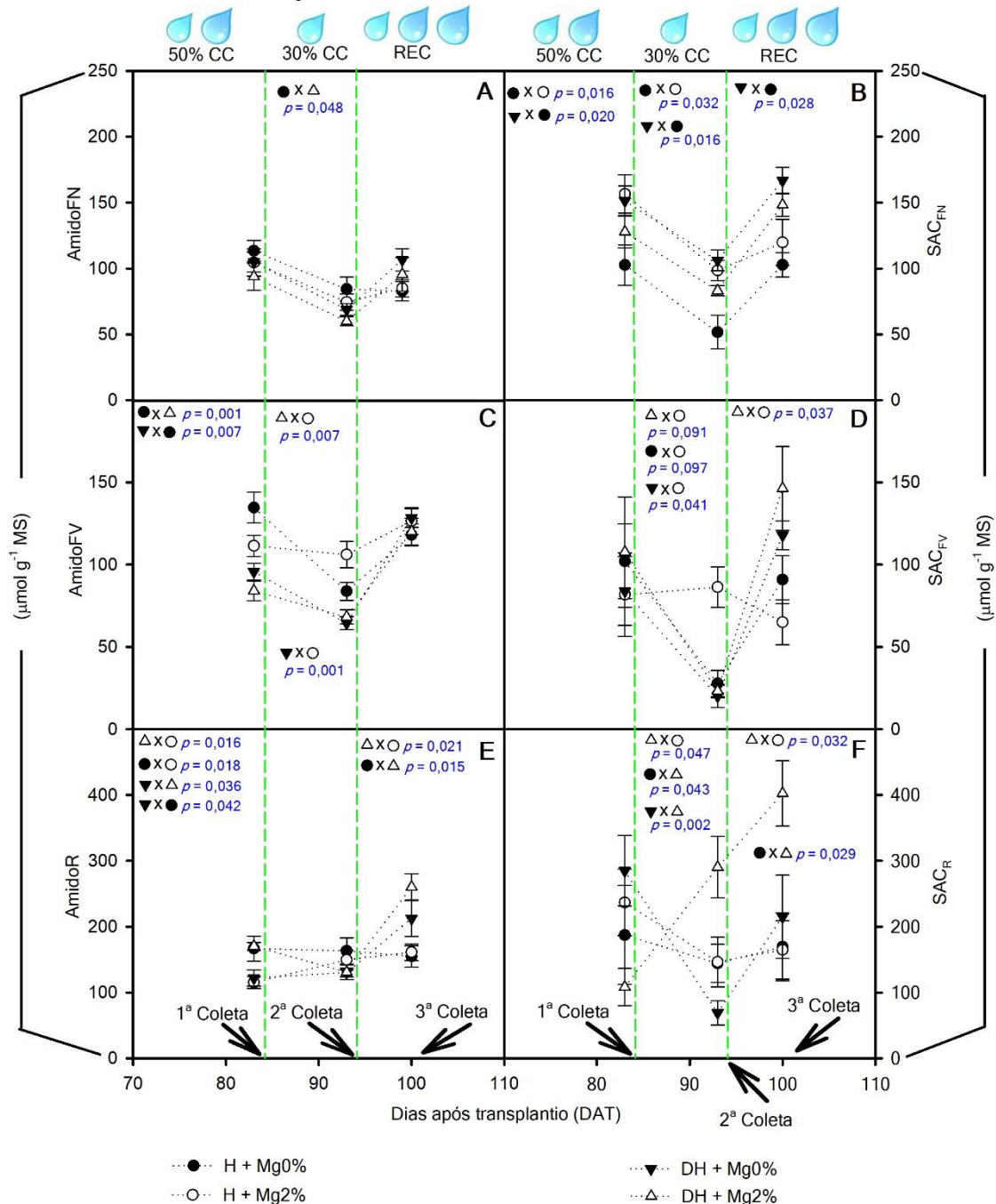
Fonte: do autor (2021).

Na primeira coleta (50% CC), não houve diferença significativa entre os tratamentos testados para AmidoFN, SAC_{FV} e SAC_R (Figura 11A, D e E). No entanto, as plantas DH + Mg0% e H + Mg2% acumularam mais SAC_{FN}, apresentando diferença significativa das plantas H + Mg0% (Figura 11B). As plantas H + Mg0% acumularam mais AmidoFV, apresentando diferença significativa para as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 11C). Nessa mesma coleta, as plantas DH + Mg2% acumularam mais AmidoR, diferindo significativamente das plantas H + Mg2% e DH + Mg0% (Figura 11E). Esse resultado foi semelhante as plantas H + Mg0%, que também diferiram das plantas H + Mg2% e DH + Mg0%.

Na segunda coleta (30% CC), não houve diferença significativa entre os tratamentos apenas para AmidoR (Figura 11E). No entanto, as plantas H + Mg2% apresentaram maior acúmulo de AmidoFV e SAC_{FV}, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 11C e D). Além disso, as plantas H + Mg2% também acumularam mais AmidoFV e SAC_{FV}, apresentando diferença significativa das plantas DH + Mg2% (Figura 11C e D). De outra forma, as plantas DH + Mg0% e H + Mg2% apresentaram maior acúmulo de SAC_{FN}, diferindo significativamente das plantas H + Mg0% (Figura 11B). As plantas DH + Mg2% acumularam mais SAC_R, apresentando diferença significativa para os demais tratamentos testados (Figura 11F).

Na terceira coleta (REC), não houve diferença significativa entre os tratamentos testados para AmidoFN e AmidoFN (Figura 11A e C). As plantas DH + Mg0% acumularam mais SAC_{FN}, diferindo estatisticamente das plantas H + Mg0% (Figura 11B). De outra forma, as plantas DH + Mg2% acumularam mais SAC_{FV} e AmidoR e SAC_R, apresentando diferença significativa para as plantas H + Mg2%, respectivamente (Figura 11D, E e F). Além disso, as plantas DH + Mg2% também apresentaram mais AmidoR e SAC_R, quando reidratadas, diferenciando-se significativamente das plantas H + Mg0% (Figura 11E e F).

Figura 11 - Amido [A, C e E] e sacarose (SAC) [B, D e F] em folha nova (FN), folha velha (FV) e raiz (R), respectivamente, de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



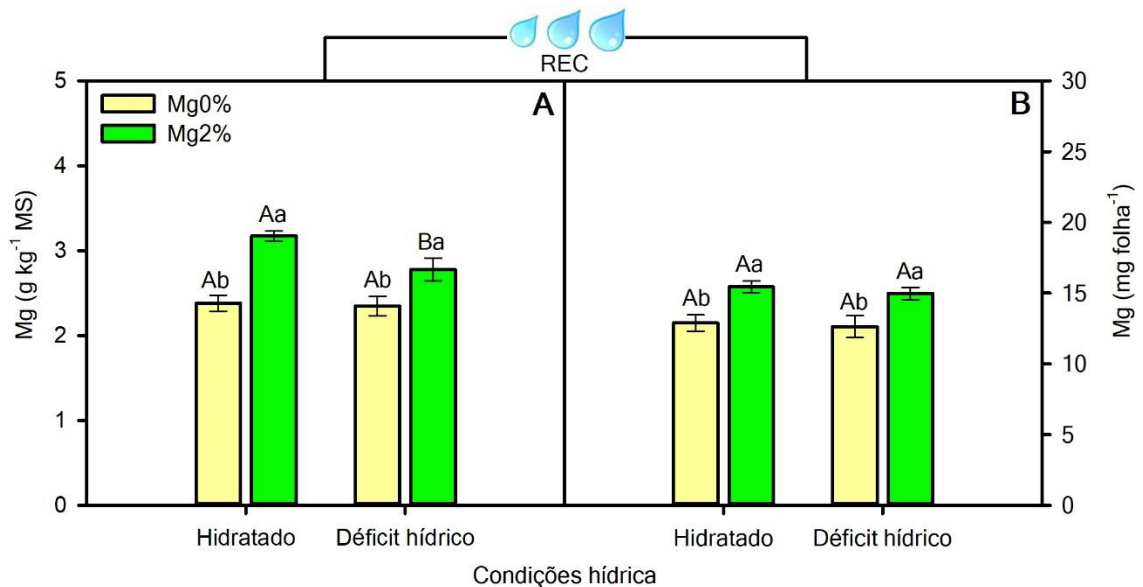
O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

3.5 Teor e acúmulo de nutrientes foliar e eficiência no uso do nutriente

A suplementação de magnésio foliar (Mg2%) resultou em maiores concentrações de Mg foliar em mudas de café para ambas condições hídricas, tanto para o teor, quanto para o acúmulo de Mg foliar (Figura 12). Assim sendo, as plantas H + Mg2% apresentaram maior teor e acúmulo de Mg, havendo diferença significativa, quando comparadas com as plantas H + Mg0% e DH + Mg2%, respectivamente (Figura 12A e B). Além disso, as plantas DH + Mg2% apresentaram os maiores valores para esses parâmetros, quando comparadas com as plantas DH + Mg0%. De outra forma, não houve diferença significativa entre as plantas H + Mg0% e DH + Mg0%, tanto para o teor, quanto para o acúmulo de Mg na folha.

Figura 12 - Teor [A] e o acúmulo foliar [B] de magnésio (Mg), de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).



As letras minúsculas comparam as suplementações de Mg foliar e as maiúsculas comparam as condições hídricas (Tukey, $p \leq 0,05$). As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

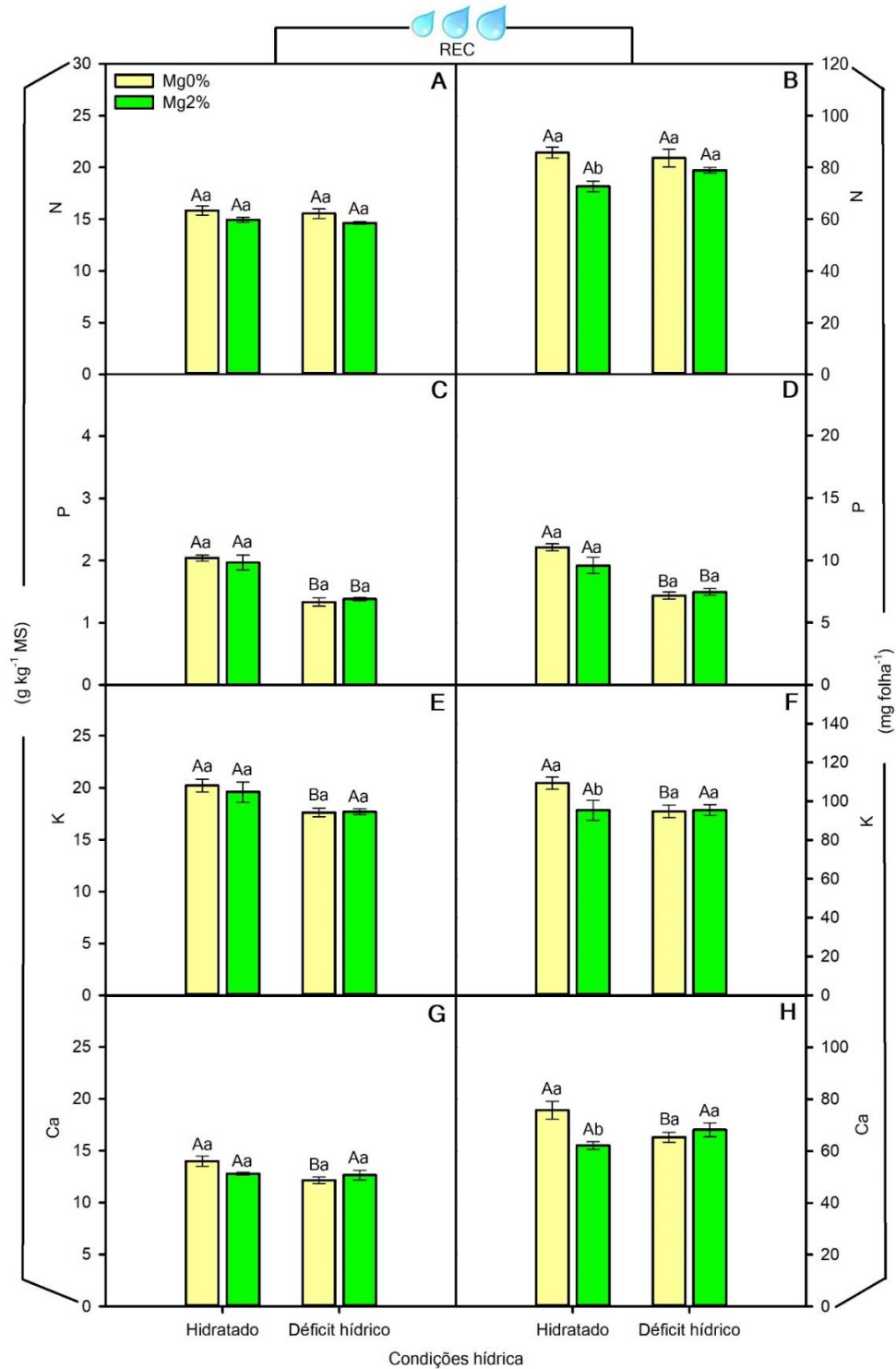
Para o teor de N na folha, não houve diferença significativa entre os tratamentos testados (Figura 13A). Porém, foi verificada diferença significativa para as plantas H + Mg0%, sendo superior as plantas H + Mg2%, quanto ao acúmulo de N (Figura 13B). As

plantas H + Mg0% e H + Mg2% apresentaram maior teor e acúmulo de P na folha, apresentando diferença significativa em comparação às plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, respectivamente (Figura 13C e D).

Para o teor de K na folha, apenas as plantas H + Mg0% apresentaram diferença significativa, sendo superior às plantas DH + Mg0% (Figura 13E). No entanto, para o acúmulo de K foliar, as plantas H + Mg0% apresentaram os maiores valores médios, diferindo significativamente das plantas H + Mg2% e DH + Mg0%, respectivamente (Figura 13F). As plantas H + Mg2% e DH + Mg2% foram semelhantes quanto ao conteúdo de K na folha.

Para o teor de Ca na folha foi observada diferença significativa apenas para as plantas H + Mg0%, que foram superiores as plantas DH + Mg0% (Figura 13G). Por outro lado, quanto ao acúmulo deste nutriente na folha, as plantas H + Mg0% apresentaram os maiores resultados, diferindo significativamente das plantas H + Mg2% e DH + Mg0% (Figura 13H). Porém, as plantas H + Mg2% e DH + Mg2% foram semelhantes quanto ao acúmulo de Ca foliar.

Figura 13 - Teor e acúmulo foliar, respectivamente, de nitrogênio (N) [A e B], fósforo (P) [C e D], potássio (K) [E e F] e cálcio (Ca) [G e H], de mudas de caféiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).



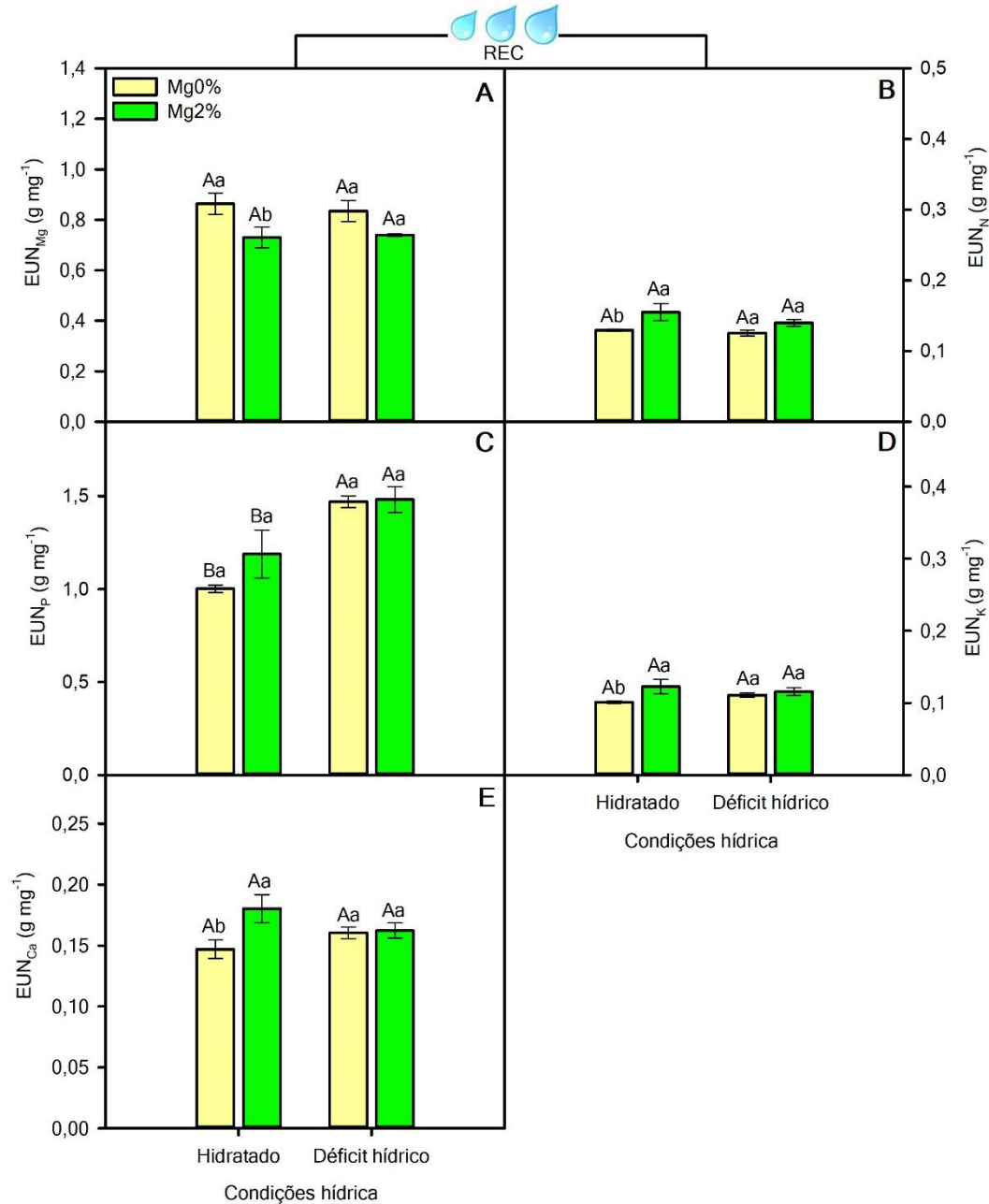
As letras minúsculas comparam as suplementações de Mg foliar e as maiúsculas comparam as condições hídrica (Tukey, $p \leq 0,05$). As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

Quanto à EUN, para a EUN_{Mg} foi verificada diferença significativa apenas na condição H, onde as plantas H + Mg0% apresentaram os maiores valores, quando comparadas com as plantas H + Mg2% (Figura 14A). Por outro lado, houve maior EUN das plantas H + Mg2% para EUN_N , EUN_K e EUN_{Ca} , diferindo significativamente das plantas H + Mg0% (Figura 14B, D e E). Além disso, para os demais tratamentos não foi verificada diferença significativa nessas características analisadas.

Para a EUN_P , as plantas DH apresentaram os maiores valores, onde as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, diferiram significativamente das plantas H + Mg0% e H + Mg2%, respectivamente (Figura 14C).

Figura 14 - Eficiência no uso do nutriente (EUN), de magnésio (EUN_{Mg} , A), nitrogênio (EUN_N , B), fósforo (EUN_P , C), potássio (EUN_K , D) e cálcio (EUN_{Ca} , E), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).



As letras minúsculas comparam as suplementações de Mg foliar e as maiúsculas comparam as condições hídricas (Tukey, $p \leq 0,05$). As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

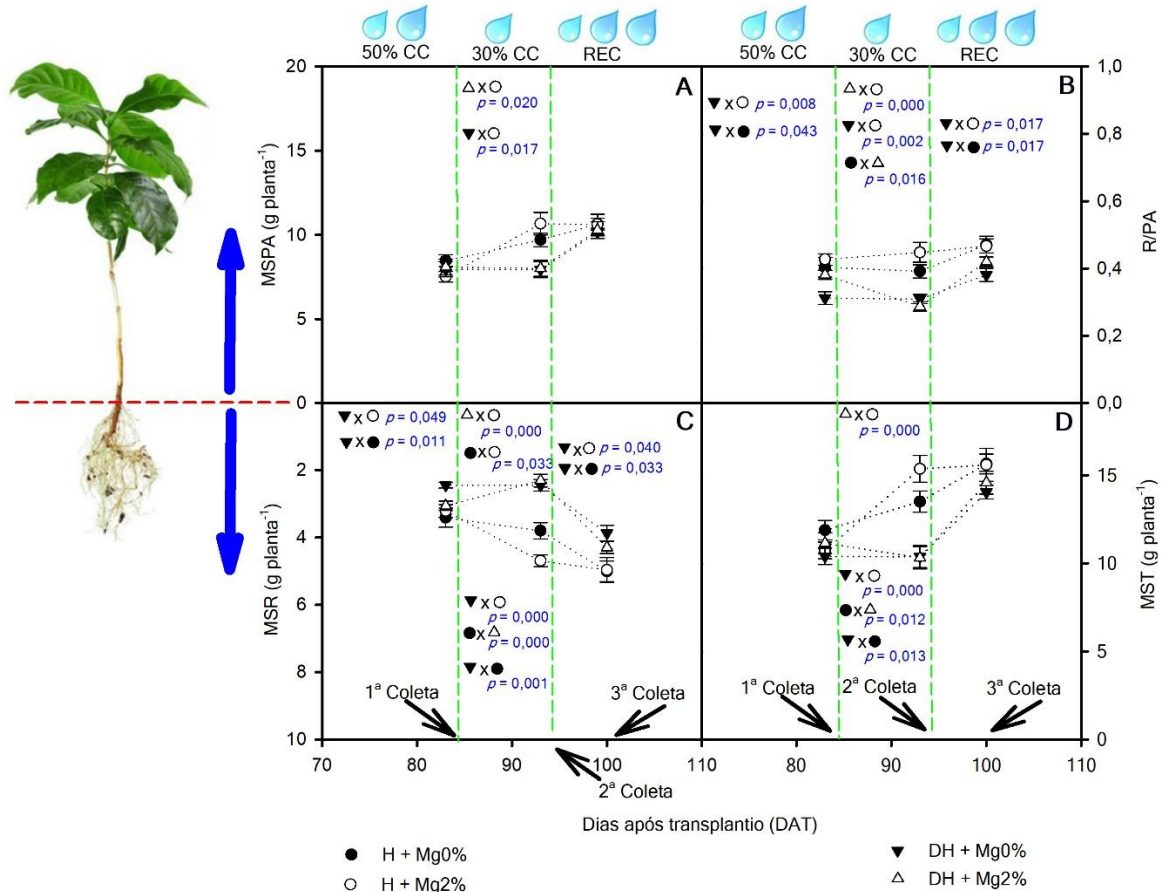
3.6 Acúmulo de massa seca e índice tolerância ao estresse

Analisando o efeito dos tratamentos testados no acúmulo de massa seca das plantas, na primeira coleta (50% CC), não houve diferença significativa entre os tratamentos para a MSPA e MST (Figura 15A e D). No entanto, as plantas H + Mg0% e H + Mg2% apresentaram maior acúmulo de MSR, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 15C). Além disso, as plantas DH + Mg2% apresentaram acúmulo de MSR semelhantemente as plantas H + Mg0% e H + Mg2%. Essas plantas também apresentaram maior relação R/PA, diferindo significativamente das plantas DH + Mg0% (Figura 15B). Ainda sobre esse parâmetro, as plantas DH + Mg2% também apresentaram relação R/PA semelhantemente as plantas H + Mg0% e H + Mg2%.

Na segunda coleta (30% CC), as plantas H + Mg2% obtiveram maior acúmulo de MSPA e MST, apresentando diferença significativa quando comparadas com as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 15A e D). As plantas H + Mg2% apresentaram maior acúmulo de MSR, diferindo significativamente dos demais tratamentos (Figura 15C). Além disso, as plantas H + Mg0% obtiveram ganho de MSR e MST superior as plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 15C e D). De outra forma, as plantas H + Mg2% apresentaram maior R/PA, diferindo estatisticamente das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2% (Figura 15B). Assim como, as plantas H + Mg0% obtiveram maior relação R/PA quando comparadas com as plantas DH + Mg2%.

Na terceira coleta (REC), não houve diferença significativa entre os tratamentos para a MSPA e MST (Figura 15A e D). Quando reidratadas as plantas H + Mg0% e H Mg2% apresentaram maior relação R/PA e MSR, respectivamente, havendo diferença significativa quando comparadas com as plantas DH + Mg0% (Figura 15B e C).

Figura 15 - Massa seca da parte aérea (MSPA) [A], relação raiz/parte aérea (R/PA) [B], massa seca da raiz (MSR) [C] e total (MST) [D], de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

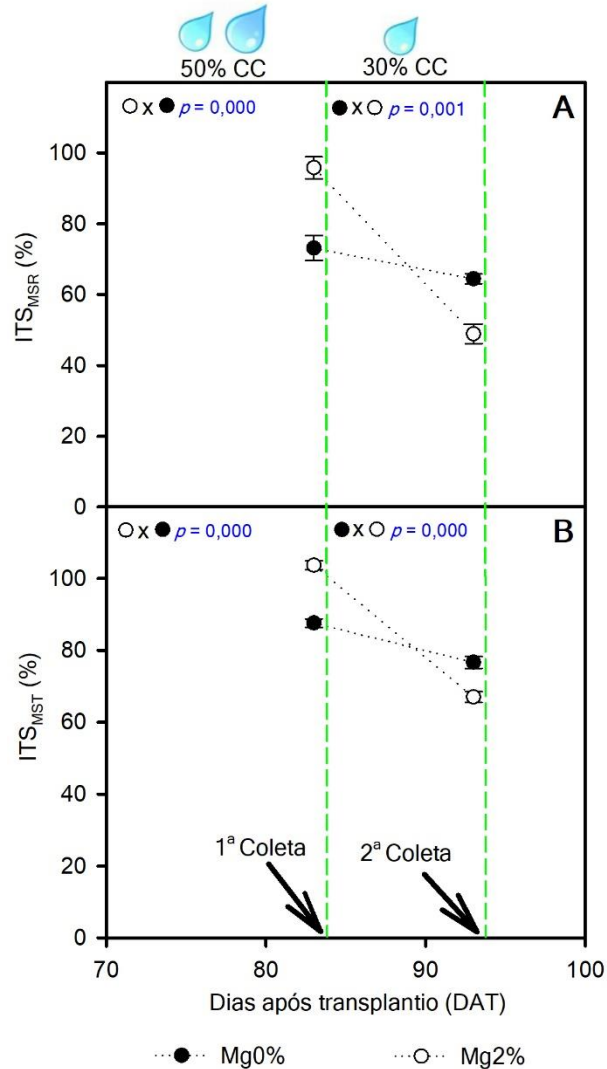


O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

Na primeira coleta (50% CC), as plantas que receberam a aplicação do Mg foliar (Mg2%) apresentaram maior ITS_{MSR} e ITS_{MST} , diferindo significativamente das plantas Mg0%, respectivamente (Figura 16A e B). No entanto, na segunda coleta (30% CC), as plantas Mg0% foram as que obtiveram maior ITS_{MSR} e ITS_{MST} , apresentando diferença significativa das plantas Mg2%, respectivamente.

Figura 16 - Índice de tolerância ao estresse pela massa seca da raiz (ITS_{MSR}) [A] e pela massa seca total (ITS_{MST}) [B], de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em dois momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)].



O valor de p (Tukey, $p \leq 0,05$) é apresentado quando ocorreu diferença significativa entre os tratamentos. As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$).

Fonte: do autor (2021).

3.7 Análise de componentes principais (PCA)

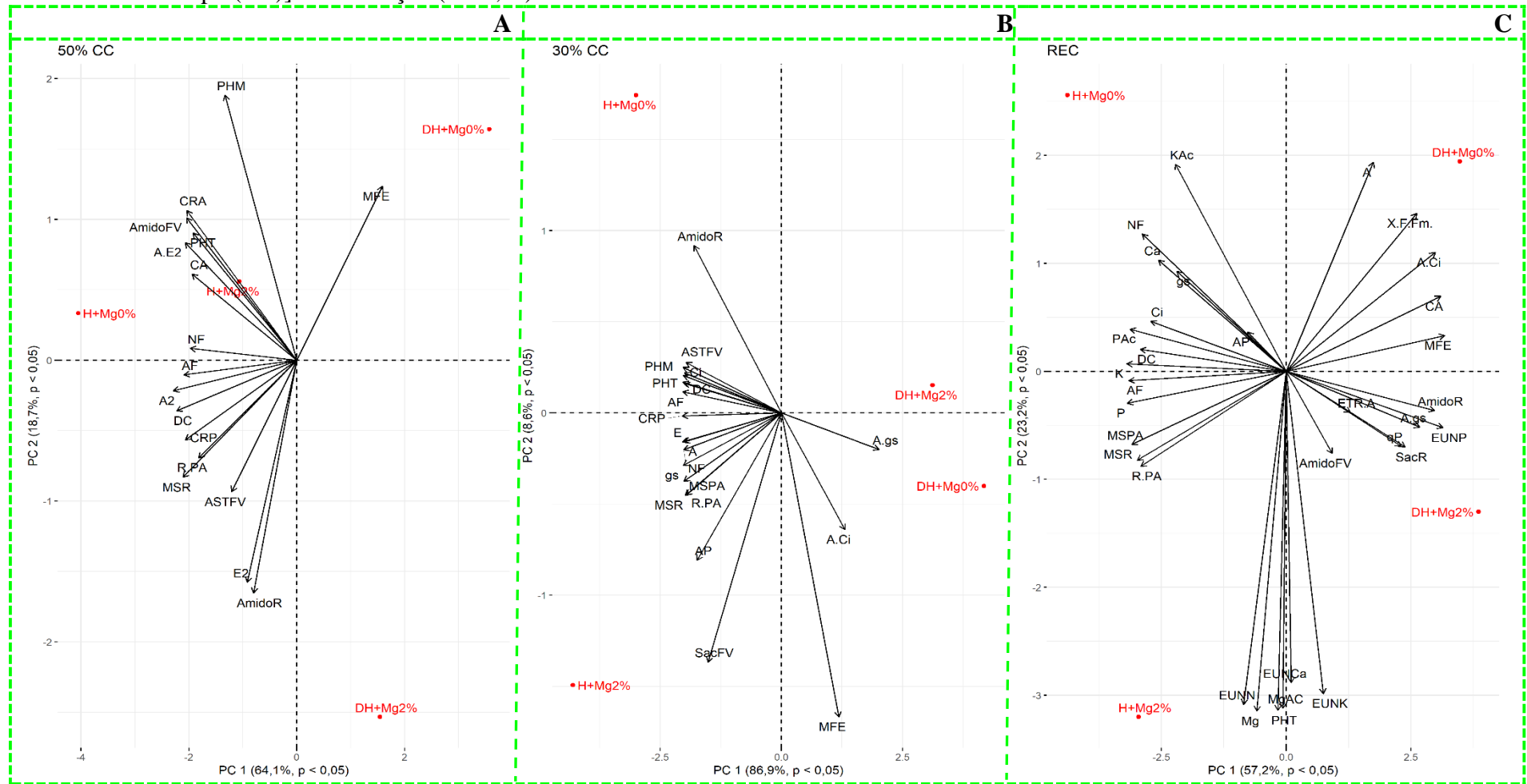
Na primeira coleta (50% CC), a PCA mostrou que a maioria das variáveis utilizadas nesta análise estão correlacionadas com a PC1 (Figura 17A). Nesta componente estão as plantas H + Mg2%, sugerindo que há correlação positiva com as variáveis EUA, Ψ_{wmd} , CRA, CA e AmidoFV. De outra forma, a PCA mostrou que as plantas DH + Mg2% estão na PC2,

agrupando as variáveis MSR, CRP, R/PA *E*, AmidoR e AST_{FV}, sugerindo que há aumento positivo dessas características no referido tratamento. Os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) com 64,10 e 18,70%, respectivamente, da variância total, representam 82,80% da variância acumulada, ambos com efeito significativo ($p < 0,05$).

Já na segunda coleta (30% CC), quase todas as variáveis foram agrupadas na PC1, em direção as plantas H + Mg0% e H + Mg2%, reforçando que há correlação positiva com essas variáveis nesses tratamentos (Figura 17B). Assim sendo, as plantas H + Mg2% favorecem correlação positiva para as variáveis SAC_{FV}, AP, MSR, R/PA, MSPA, NF, A, *gs* e *E*. Além disso, esses dois componentes apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$), representando 95,50% da variância acumulada.

Por outro lado, na terceira coleta (REC), as plantas H + Mg0% e H + Mg2%, também apresentaram maior conjunto de variáveis com correlação positiva. Porém, quando reidratadas, as plantas DH + Mg2% proporcionam aumentos positivos para as variáveis ETR/A, qP, SAC_R, EUAi, AmidoFV, AmidoR, EUN_P e MFE (Figura 17C). No somatório da variância acumulada, esses dois componentes representaram 80,40%, com efeito significativo ($p < 0,05$).

Figura 17 - Análise de componentes principais (PCA), das variáveis que apresentaram mais correlação positiva ($p < 0,05$), de mudas de café submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50% (A) e 30% (B) da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC, C).



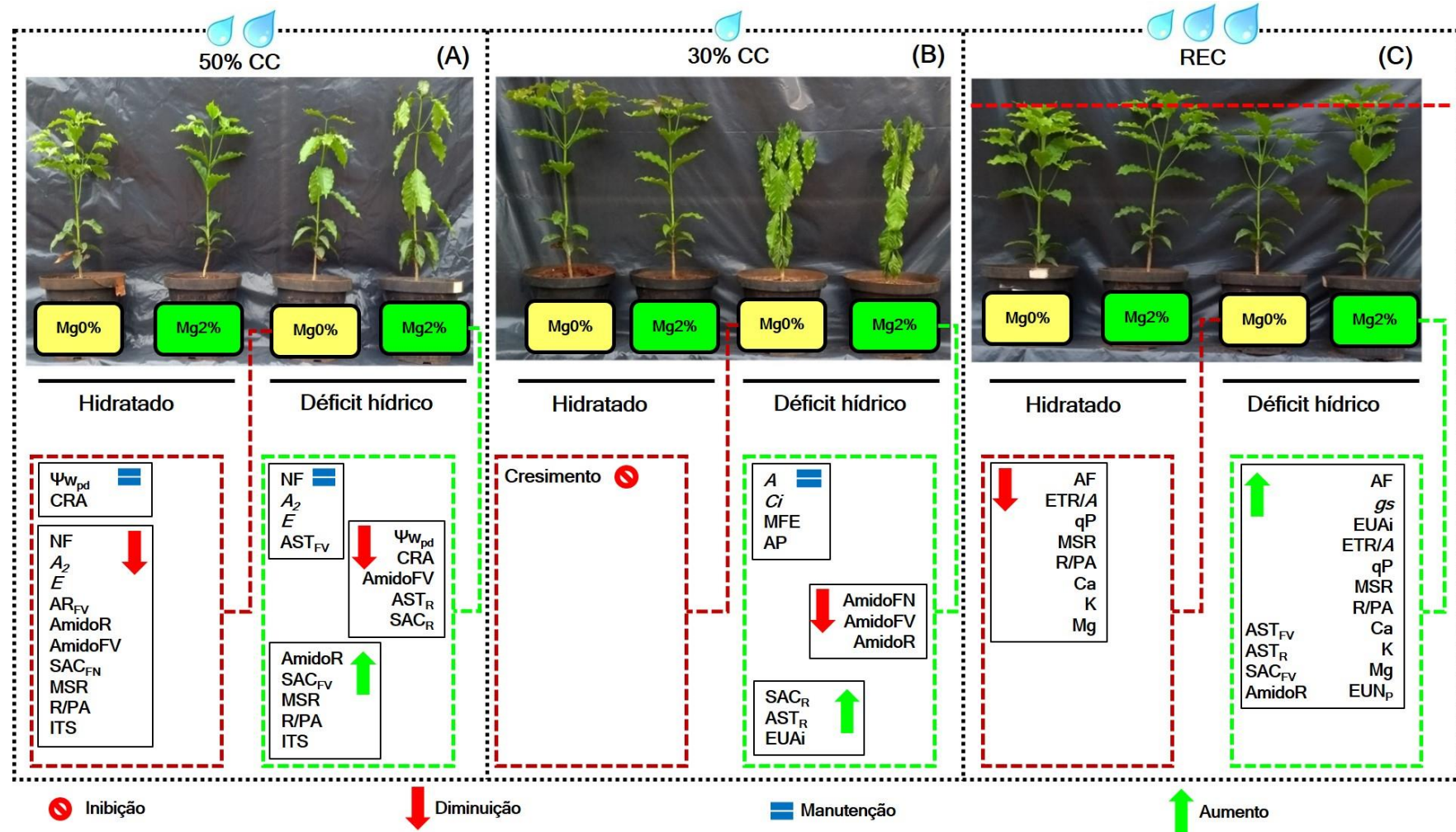
Variáveis: consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$, PHT) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$, PHM), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), assimilação de CO₂ da planta inteira (A_2), transpiração (E_2), eficiência do uso da água (EUA, A.E2), assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), concentração intercelular de CO₂ (C_i) e eficiência intrínseca do uso da água (EUA_i, A. g_s), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i , A.Ci), eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/F_m'$, X.F.Fm.), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A , ETR.A), açúcares solúveis totais em folha velha (ASTFV), amido em folha velha (AmidoFV) e raiz (AmidoR), sacarose em folha velha (SacFV) e raiz (S_{AcR}), massa seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR), relação raiz/parte aérea (R/PA, R.PA), teores foliar de magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca), acúmulo foliar de magnésio (Mg_{Ac}), fósforo (P_{Ac}) e potássio (K_{Ac}), e eficiência no uso do nutriente (EUN), de nitrogênio (EUN_N), fósforo (EUN_P), potássio (EUN_K) e cálcio (EUN_{Ca}).

Fonte: do autor (2021).

3.8 Representação dos tratamentos

Com os resultados das análises uni e multivariadas foi montado um esquema resumindo os principais resultados obtidos das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, nos períodos de 50% e 30% da CC e REC, respectivamente (Figura 18). Esses resultados foram demonstrados quanto à inibição do crescimento, manutenção, diminuição e aumento de algumas características analisadas, após aplicação dos tratamentos.

Figura 18 - Mudas de cafeeiro submetidas à duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50% (A) e 30% (B) da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).



Os quadros abaixo apresentam o resumo dos principais resultados das plantas DH + Mg0% e DH + Mg2%, em cada coleta. *Variáveis: potencial hídrico foliar ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), assimilação de CO₂ (A_2) e transpiração (E_2), análise 2, considerando todas as folhas do dossel vegetativo, assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), concentração intercelular de CO₂ (C_i) e eficiência intrínseca do uso da água (EUAi), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A), açúcares redutores em folha velha (AR_{FV}), açúcares solúveis totais em folha velha (AST_{FV}) e raiz (AST_R), amido em folha nova (AmidoFN), velha (AmidoFV) e raiz (AmidoR), sacarose em folha nova (SAC_{FN}), velha (SAC_{FV}) e raiz (SAC_R), massa seca da raiz (MSR), relação raiz/parte aérea (R/PA), índice de tolerância ao estresse (ITS), teor e acúmulo foliar de magnésio (Mg), potássio (K) e cálcio (Ca) e eficiência no uso do nutriente (EUN), de fósforo (EUNP).

Fonte: do autor (2021).

4 DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo mostraram que os cafeeiros apresentaram variadas repostas aos tratamentos de disponibilidade hídrica e suplementação de Mg foliar. Sob condições ambientais de baixa disponibilidade hídrica no solo, as plantas apresentam diversas estratégias e mecanismos de adaptação, variando quanto ao tipo de planta, estágio fenológico e o nível de déficit hídrico, como de moderado a severo (KANECHI et al., 1988; CHONÉ et al., 2001). Assim, os tratamentos foram eficazes para mostrar como as plantas respondem ao déficit hídrico, após a suplementação com Mg. Com isto, esses resultados são importantes para fins práticos, na manutenção do estado nutricional dos cafeeiros mediante à eventos de déficit hídrico.

O déficit hídrico no qual as plantas foram submetidas na primeira coleta (50% CC) foi do tipo moderado, enquanto que na segunda coleta, o déficit hídrico foi mais severo (Figura 4), onde as plantas estavam sob condições de baixa disponibilidade hídrica na zona do sistema radicular, considerado crítico para a produtividade das culturas (KANECHI et al., 1988; CHONÉ et al., 2001).

No entanto, a redução do $\Psi_{w_{pd}}$ e do CRA nas plantas DH + Mg2% (Figuras 4B e C; e 18A), em comparação as plantas controle, pode ser relacionada com a maior concentração do íon Mg^{2+} na folha (Figura 12), reduzindo o potencial hídrico em relação ao solo (CHONÉ et al., 2001; MUNNS, 2002; GUO et al., 2016). Assim, supostamente o Mg estaria envolvido no ajustamento osmótico, pois assim como o K, o mesmo atua na regulação do turgor celular (MARSCHNER, 2012; GERENDÁS; FÜHRS, 2013). Com isto, retornando à disponibilidade hídrica, na terceira coleta (REC), essas plantas apresentam maior capacidade de absorção de água, como foi mostrado pelos resultados do consumo de água. Assim sendo, a suplementação com o Mg possivelmente promoveu uma melhoria nos mecanismos de absorção de água dessas plantas (GITTO; FRICKE, 2019; ZHANG et al., 2020).

Neste contexto, essas plantas apresentam maior capacidade de recuperação quando ocorrer o retorno da disponibilidade hídrica do solo, favorecendo a atividade metabólica (GALHO et al., 2007; REICH et al., 2016), e conseqüentemente, melhor desempenho produtivo em condições favoráveis (LIVRAMENTO et al., 2003; PEREIRA et al., 2008; ALVES et al., 2011).

Em condições de déficit hídrico moderado as plantas podem manter a atividade fotossintética e o turgor celular por determinado período (BOYER, 1970; MORISON et al.,

2008). No entanto, no período de 50% CC, os cafeeiros DH + Mg0% foram sensíveis aos efeitos desse estresse, afetando o crescimento, como a redução significativa do NF (Figuras 5C e 18A) e trocas gasosas (Figuras 6A e B, e 18A), diminuindo o conteúdo de AmidoR e AmidoFV (Figuras 11C e E, e 18A); ou seja, ocorreu o consumo de reservas. Assim, essas plantas apresentaram menor MSR e R/PA, proporcionando menor ITS. Nessas condições, as plantas utilizam as reservas acumuladas, no processo de respiração para manutenção de suas funções vitais (GALHO et al., 2007; REICH et al., 2016) e não investindo em crescimento e desenvolvimento.

A paralização do crescimento das plantas DH + Mg0% com o aumento da severidade do estresse, na coleta de 30% CC (Figura 18B), é uma resposta das plantas à falta de água na zona radicular (KANECHI et al., 1988), como inibição do crescimento da raiz (MORISON et al., 2008; SICHER et al., 2012). O crescimento radicular, assim como o seu sistema hidráulico, apresenta como característica de serem altamente plásticos e estão em constantes ajustes, como resposta as variações de sinais do solo, como no caso da deficiência hídrica, o que tem efeito direto no crescimento e desenvolvimento das plantas (MAUREL; NACRY, 2020).

A suplementação com Mg foliar estimulou o crescimento das plantas, como no caso das plantas DH + Mg2%, na primeira coleta (50% CC), o que evidencia a importância desse elemento para o crescimento das plantas, principalmente nessas condições limitantes (HERMANS et al., 2013; HOSSEINI et al., 2019; BUCHELT et al., 2020). Assim, plantas bem nutridas com esse elemento favorece seu crescimento e desenvolvimento, como foi observado neste trabalho, através de parâmetros como o NF (Figuras 5C e 18A), trocas gasosas, como *A* e *E* (Figuras 6A e B, e 18A), além do conteúdo de AST_{FV} (Figuras 10D e 18A). A maior produção de AST é primordial para o crescimento das plantas, que são carboidratos fundamentais para o metabolismo vegetal, como na formação de compostos orgânicos para o acúmulo de reservas energéticas, carboidratos estruturais, ou açúcares de translocação, no caso da sacarose (ALVES et al., 2011; BUCHELT et al., 2020).

Plantas sob condições de déficit hídrico ativam respostas, como mecanismos de tolerância ao estresse, assim como foi evidenciando neste trabalho, na segunda coleta (30% CC), com respostas de manutenção de *A* e *C_i* (Figuras 7A e D, e 18B), além de AP e MFE (Figuras 5A e G, e 18B), das plantas DH + Mg2%, mesmo em condições de déficit hídrico severo (KANECHI et al., 1988). Assim, o Mg foi eficiente para manter o crescimento,

possivelmente, por ser cofator de várias enzimas fotossintéticas, que são envolvidas na assimilação de CO₂ (HERMANS et al., 2013; CAKMAK; KIRKBY, 2008; MAATHUIS, 2009).

Como outra resposta de tolerância ao estresse, é a produção e translocação de carboidratos e acúmulo de solutos osmoticamente ativos e reservas energéticas (ZHOU et al., 2020), como foi evidenciado nas plantas DH + Mg2%, durante primeira coleta (50% CC), no caso da maior produção de SAC_{FV} (Figuras 11 e 18A), que proporcionou maior tolerância dessas plantas às condições limitantes impostas neste trabalho. Assim, foi possível manter uma relação fonte-dreno, adequada à essa situação de estresse, estimulando a translocação para o sistema radicular (MARTINAZZO et al., 2015; BUCHELT et al., 2020). A partir disso, foi verificado que essas plantas acumularam mais AmidoR (Figuras 11E, 18A), que é o carboidrato de reserva fundamental para o crescimento das plantas (LAVIOLA et al., 2007). Assim sendo, provavelmente, essas plantas continham mais reservas energéticas (MORISON et al., 2008; MARTINAZZO et al., 2015), o que promoveu maior MSR e, conseqüentemente, maior R/PA e ITS (Figura 18A).

Neste sentido, fica evidenciado o papel do Mg na produção e translocação de carboidratos (CAKMAK et al., 1994; GEIGER, 2011; TRÄNKNERA et al., 2018), favorecendo o crescimento das plantas nessas condições limitantes, de déficit hídrico moderado (KANECHI et al., 1988; CHONÉ et al., 2001). Assim, reforça a importância do manejo nutricional das plantas, que deve ser realizado de forma adequada, como no caso do fornecimento adequado de Mg, que é fundamental na atividade fotossintética das plantas, favorecendo o crescimento e o desenvolvimento da cultura (GUO et al., 2016; FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2018; TRÄNKNER; JAGHDANI, 2019).

De outra forma, com o aumento da severidade do estresse (30% CC), a redução do conteúdo de amido nas plantas DH + Mg2% (Figura 18B), demonstra ser uma resposta dessas plantas ao tratamento, ou seja, ocorreu o consumo das reservas energéticas (DaMATTA et al., 2018), para manutenção do metabolismo celular (GALHO et al., 2007; REICH et al., 2016). Assim sendo, essas plantas apresentaram melhor desempenho nessa condição de estresse hídrico, aumentando o conteúdo de SAC_R e AST_R, além de manterem maior EUAi (Figura 18B).

Desse modo, a aplicação de Mg foliar, estimulou maior produção e translocação de carboidratos, proporcionando melhor desempenho dos cafeeiros em condições de déficit

hídrico, em relação às plantas hidratadas, durante o período de 50% CC e proporcionou maior acúmulo de reservas energéticas, no caso do amido, no período de 30% CC, em que, esse aumento no teor desses açúcares, promoveu maior investimento em crescimento e desenvolvimento, além de sobrevivência, no caso do estresse mais severo (KANECHI et al., 1988; CHEN et al., 2020).

Com o retorno da disponibilidade hídrica do solo (REC), as plantas DH + Mg2% obtiveram melhor desempenho, ocorrendo melhor recuperação do estresse hídrico, quando comparadas com as plantas DH + Mg0% (Figura 18C), no qual, provavelmente, foi devido ao maior acúmulo de carboidratos no sistema radicular, que ocorreu durante as fases anteriores de intensidade do estresse. Assim, essas plantas foram mais responsivas na retomada do crescimento após reidratação (SICHER et al., 2012), o que foi possível o investimento dessas maiores reservas em crescimento, além da sobrevivência (manutenção) (CHEN et al., 2020).

Neste sentido, as plantas DH + Mg2% apresentaram melhor desempenho do aparato fotossintético, como foi indicado pelo ETR/A, qP, SAC_R, EUAi, AmidoFV, AmidoR, EUN_P e MFE (Figuras 17C e 18C), que são respostas importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (WANG et al., 2018). Assim, essas plantas apresentaram melhor recuperação dos efeitos deletérios causados pelo déficit hídrico, como foi evidenciado pela melhor resposta de qP, além da ETR/A, mostrando que apresentaram melhor atividade fotoquímica, que favoreceu um incremento na produção e translocação de açúcares, no caso de maior AmidoFV, SAC_R e AmidoR. Com isso, foi possível apresentar maior MFE, que é uma característica importante para a planta, pois faz uma relação do ganho de massa por área foliar, ou seja, carbono incorporado por área fotossintética (QADERI; KUREPIN; REID, 2006; MARTEL; TAYLOR; QADERI, 2020; VANDEGEER et al., 2021).

Com isto, houve melhor indicação de recuperação do crescimento, como aumento na produção de açúcares e acúmulo de AmidoR. Deste modo, essas plantas apresentaram maior relação fonte-dreno, como indicado pela maior MSR e R/PA, que é uma resposta de cafeeiros sob condições adequadas dos fatores de produção (LIVRAMENTO et al., 2003; PEREIRA et al., 2008; ALVES et al., 2011). Além disso, somando essas respostas com a maior EUAi nas plantas DH + Mg2% após a REC, são mecanismos importantes de plantas sob condições de déficit hídrico, mostrando o uso ideal da água para o crescimento (FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2021).

De forma geral, o aumento e manutenção no teor e acúmulo dos nutrientes N, K, Mg e Ca nas folhas das plantas DH + Mg2% é importante para as funções da planta, favorecendo o crescimento, pois esses elementos são fundamentais para o metabolismo vegetal, atuando na atividade enzimática, formação de proteínas e composição estrutural das células vegetais (MARSCHNER, 2012; FARHANGI-ABRIZ; GHASSEMI-GOLEZANI, 2018; PARADISONE et al., 2021). Com o aumento desses nutrientes, como K e Ca, são importantes no metabolismo da planta, no caso do controle da abertura estomática, carregamento do floema, síntese de aminoácidos e ácidos nucléicos, mecanismos de sinalização, como modificações em rotas metabólicas e composição estrutural, como parede celular (MARSCHNER, 2012; MAK et al., 2014; BUCHELT et al., 2020).

De outra forma, para o resultado do P na folha, em condições de déficit hídrico, o mesmo pode ter sido remobilizado, como foi demonstrado com o aumento da EUN_P nessas condições (Figuras 14C e 17C), pois o mesmo é fundamental no metabolismo da planta, como no caso de gastos energéticos, que são necessários para os mecanismos de respostas ao estresse hídrico (CHEN et al., 2020).

O aumento na eficiência no uso dos nutrientes, como no caso de EUN_N , EUN_K e EUN_{Ca} , nas plantas H + Mg2%, estabelece o sinergismo desses elementos, aumentando suas concentrações no tecido foliar, sob condições de boa disponibilidade hídrica. Assim, isso foi muito importante para promover o maior crescimento dessas plantas (Figura 15), o que é fundamental para fins práticos de manejo da cultura, como o adequado fornecimento de Mg, para o melhor desempenho das funções vitais da planta, como melhor atividade fotoquímica, aumento na produção e translocação de fotoassimilados, proporcionando maior acúmulo de reservas energéticas, como no caso do amido, apresentando mais energia para o crescimento e desenvolvimento (GUO et al., 2016; YAN et al., 2018; WANG et al., 2018; CHEN et al., 2020).

Portanto, esses resultados suportam a hipótese deste estudo e evidenciaram o papel do Mg na produção e translocação de carboidratos para o sistema radicular de cafeeiros, como estratégia de tolerância ao déficit hídrico. Assim, esse estudo é importante para fundamentar o valor da suplementação foliar com Mg em cafeeiros, principalmente sob condições de campo.

5 CONCLUSÕES

Mudas de cafeeiros são mais tolerantes ao déficit hídrico moderado quando suplementadas com Mg foliar, por manterem a atividade fotossintética, aumentando a translocação de açúcares e acúmulo de mais amido nas raízes.

Cafeeiros suplementados com Mg foliar apresentam melhor recuperação do déficit hídrico devido ao maior acúmulo de reservas no sistema radicular, além de melhor atividade fotoquímica e fotossintética.

A suplementação com Mg foliar favorece a adequada relação fonte-dreno em cafeeiros sob déficit hídrico moderado para a tolerância a essa condição.

Contudo, a suplementação com Mg foliar aumenta a eficiência no uso dos nutrientes em cafeeiros sob boa disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. D.; PAGLIS, C. M.; LIVRAMENTO, D. E.; LINHARES, S. S. D.; BECKER, F. B.; MESQUITA, A. C. Source-sink manipulations in *Coffea arabica* L. and its effect on growth of shoots and root system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 5, p. 956 -964, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000500013
- ARAUJO, W. L.; DIAS, P. C.; MORAES, G. A. B. K.; CELIN, E. F.; CUNHA, R. L.; BARROS, R. S.; DaMATTA, F. M. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 46, n. 10, p. 884-890, 2008. DOI: 10.1016/j.plaphy.2008.05.005
- BARR, H.D.; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 15, n. 3, p. 413-428, 1962. DOI: 10.1071/BI9620413
- BARROS, R. S.; MAESTRI, M.; VIEIRA, M.; BRAGAFILHO, L. J. Determinação de área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, v. 20, n. 107, p. 44-52, 1973.
- BATISTA, K. D.; ARAÚJO, W. L.; ANTUNES, W. C.; CAVATTE, P. C.; MORAES, G. A. B. K.; MARTINS, S. C. V.; DaMATTA, F. M. Photosynthetic limitations in coffee plants are chiefly governed by diffusive factors. **Trees**, v. 26, p. 459-468, 2012. DOI: 10.1007/s00468-011-0606-2
- BERARDI, S.; DROUET, S.; FRANCÀS, L.; GIMBERT-SURINACH, C.; GUTTENTAG, M.; RICHMOND, C.; STOLL, T.; LLOBET, A. Molecular artificial photosynthesis. **Chemical Society Reviews**, v. 43, n. 22, p. 7501-7519, 2014. DOI: 10.1039/c3cs60405e
- BJÖRKMAN, O; DEMMIG, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. **Planta**, v. 170, p. 489-504, 1987. DOI: 10.1007/BF00402983
- BOYER, J. S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiology**, v. 46, n. 2, p. 233-235, 1970. DOI: 10.1104/pp.46.2.233
- BRASIL. **Normas Climatológicas**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia. Normas climatológicas – 1960-1991. Brasília, 1992. 84p.
- BUCHELT, A. C.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA, K. S.; SOUZA ROCHA, A. M.; PRADO, R. M.; CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 532-1548, 2020. DOI: 10.1007/s42729-020-00245-7
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium

deficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 45, n. 9, p. 1245-1250, 1994. DOI: 10.1093/jxb/45.9.1245

CAKMAK, I.; KIRKBY, E.A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 692-704, 2008. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x

CARDONA, T.; SHAO, S.; NIXON, P. J. Enhancing photosynthesis in plants: the light reactions. **Essays in Biochemistry**, v. 62, n. 1, p. 85-94, 2018. DOI: 10.1042/EBC20170015

CHEN, Z.; KHAN, A.; SHI, X.; HAO, X.; TAN, D. K. Y.; LUO, H. Water-nutrient management enhances root morpho-physiological functioning, phosphorus absorption, transportation and utilization of cotton in arid region. **Industrial Crops & Products**, v. 143, 2020. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111975

CHONÉ, X.; LEEUWEN C.V.; DUBOURDIEU, D.; GAUDILLÈRE, J.P. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. **Annals of Botany**, v. 87, n. 4, p. 477-483, 2001. DOI: 10.1006/anbo.2000.1361

DaMATTA F.M.; GRANDIS A.; ARENQUE B.C.; BUCKERIDGE, M.S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, n. 7, p. 1814-1823, 2010. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.11.001

DaMATTA F.M.; MAESTRI, M.; MOSQUIM, P.R.; BARROS, R.S. Photosynthesis in coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) as affected by winter and summer conditions. **Plant Science**, v. 128, n. 1, p. 43-50, 1997. DOI: 10.1016/S0168-9452(97)00142-8

DaMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04537

DaMATTA, F.M.; LOOS R.A.; SILVA, E.A.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. **Trees**, v. 16, p. 555-558, 2002. DOI: 10.1007/s00468-002-0205-3

DAVIES, W., WILKINSON, S., LOVEYS, B. R. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. **New Phytologist**, v. 153, n. 3, p. 449-460, 2002. DOI: 10.1046/j.0028 646X.2001.00345.x.

FARHANGI-ABRIZ, S., GHASSEMI-GOLEZANI, K., How can salicylic acid and jasmonic acid mitigate salt toxicity in soybean plants? **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 147, p. 1010-1016, 2018. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.070

FARHANGI-ABRIZ, S.; GHASSEMI-GOLEZANI, K. Changes in soil properties and salt tolerance of safflower in response to biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 211, p. 1-11, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.111904

FAZUOLI, L. C.; CARVALHO, C. H. S.; CARVALHO, G. R.; FILHO, O. G.; PEREIRA, A. A.; ALMEIDA, S. R.; MATIELLO, J. B.; BARTHOLO, G. F.; SERA, T.; MOURA, W. M.; MENDES, A. N. G.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G. FERRÃO, R. G.; NACIF, A. P.; SILVAROLLA, M. B. Cultivares de café arábica (*Coffea arabica* L.). In: CARVALHO, C. H. S (Ed.). **Cultivares de café**. Brasília: EMBRAPA, 2007. 247 p.

FERNÁNDEZ, V.; RÍO, V. D.; ABADÍA, J.; ABADÍA, A. Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* (L.) Batsch): effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. **Plant and Soil**, v. 289, p. 239-252, 2006. DOI: 10.1007/s11104-006-9132-1

FITZ-GERALD, J. N.; LEHTI-SHIU, M. D.; INGRAM, P. A.; DEAK, K. I.; BIESIADA, T.; MALAMY, J. E. Identification of quantitative trait loci that regulate *Arabidopsis* root system size and plasticity. **Genetics**, v. 172, n. 1, p. 485-498, 2006. DOI: 10.1534/genetics.105.047555

FOX, J.; WEISBERG, S. **An {R} companion to applied regression, third edition**. Thousand Oaks CA: Sage. 2019. Disponível em: <<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>>. Acessado em 25 de janeiro de 2021.

GALHO, A. S.; LOPES, N. F.; BACARIN, M. A.; SOUZA LIMA, M. G. Composição química e respiração de crescimento em frutos de *Psidium cattleianum* Sabine durante o ciclo de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 061-066, 2007. DOI: 10.1590/S0100-29452007000100014

GEIGER, D. Plant sucrose transporters from a biophysical point of view. **Molecular Plant**, v. 4, n. 3, p. 395-406, 2011. DOI: 10.1093/mp/ssr029

GERENDÁS, J.; FÜHRS, H. The significance of magnesium for crop quality. **Plant and Soil**, v. 368, p. 101-128, 2013. DOI: 10.1007/s11104-012-1555-2

GITTO, A.; FRICKE, W. Zinc treatment of hydroponically grown barley plants causes a reduction in root and cell hydraulic conductivity and isoform-dependent decrease in aquaporin gene expression. **Physiologia Plantarum**, 164, n. 2, p. 176-190, 2019. DOI: 10.1111/ppl.12697

GUO, W.; NAZIM, H.; LIANG, Z.; YANG, D. Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. **The Crop Journal**, v. 4, n. 2, p. 83-91, 2016. DOI: 10.1016/j.cj.2015.11.003

HECKATHORN, S. A.; LUCIA, E. H.; ZIELINSKI, R.E. The contribution of drought-related decreases in photosynthetic capacity during and after drought in prairie grasses. **Physiologia Plantarum**, v. 101, n. 1, p. 173-82, 1997. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1997.tb01834.x

HERMANS, C.; CONN, S.J.; CHEN, J.; XIAO, Q.; VERBRUGGEN, N. An update on magnesium homeostasis mechanisms in plants. **Metallomics**, v. 5, n. 9, p. 1170-1183, 2013. DOI: 10.1039/c3mt20223b

HERMANS, C.; JOHNSON, G.N.; STRASSER, R.J.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v. 220, n. 2, p. 344-355, 2004. DOI: 10.1007/s00425-004-1340-4

HERMANS, C.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterization of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 418, p. 2153-2161, 2005. DOI: 10.1093/jxb/eri215

HOSSEINI, S. A.; NASERI RAD, S.; ALI, N.; YVIN, J. C. The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in Mg-deficient conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 4, 2019. DOI: 10.3390/ijms20040969

KANECHI, M.; UCHIDA N.U.; YASUDA, T.; YAMAGUCHI, T. Relationships between leaf water potential and photosynthesis of *Coffea arabica* L. grown under various environmental conditions as affected by withholding irrigation and re-irrigation. **Japanese Journal of Tropical Agriculture**, v. 32, n.1, p. 16-21, 1988. DOI: 10.11248/jsta1957.32.16

KONRAD, M. L. F.; SILVA, J. A. B.; FURLANI, P. R.; MACHADO, E. C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, v. 64, n. 3, p. 339-347, 2005. DOI: 10.1590/S0006-87052005000300004

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con um estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Económica. México. 1948, p 479.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes & Textos, 2000. 531p.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D.; MENDONÇA, S. M.; NETO, A. P. Alocação de fotoassimilados em folhas e frutos de cafeeiro cultivado em duas altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.11, p. 1521-1530, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007001100002

LIVRAMENTO, D. E.; ALVES, J. D.; BARTHOLO, G. F.; GUIMARÃES, P. T. G.; MAGALHÃES, M. M.; PEREIRA, T. A. Influência da produção nos níveis de carboidratos e recuperação de cafeeiros após recepagem. **Revista Ceres**, v. 50, n. 292, p.737-752, 2003.

MAATHUIS, F.J. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 250-258, 2009. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.04.003

MAK, M.; BABLA, M.; XU, S.C.; O'CARRIGAN, A.; LIU, X.H.; GONG, Y.M.; HOLFORD, P.; CHEN, Z.H. Leaf mesophyll K⁺, H⁺ and Ca²⁺ fluxes are involved in drought-induced decrease in photosynthesis and stomatal closure in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 98, p. 1-12, 2014. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2013.10.003

MALAVOLTA, E. **Elementos da nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 280 p, 1980.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. third ed. Academic Press,

London, 2012. DOI: 10.1016/C2009-0-63043-9

MARTEL, A. B.; TAYLOR, A. E.; QADERI, M. M. Individual and interactive effects of temperature and light intensity on canola growth, physiological characteristics and methane emissions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 157, p. 160-168, 2020. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.10.016

MARTINAZZO, E. G.; PERBONI, A. T.; POSSO, D. A.; AUMONDE, T. Z.; BACARIN, M. A. Análise de crescimento e partição de assimilados em plantas de tomateiro cv. Micro-Tom submetidas ao nitrogênio e piraclostrobina. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 5, p. 3001-3012, 2015. DOI: 10.5433/1679-0359.2015v36n5p3001

MARTINS, R. A. C.; PEREIRA, H. S.; REIS, E. F. Lecitina, silicone e amido na adubação foliar de couve (*Brassica oleracea* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 6, p. 1470-1476, 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000600017

MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, M.L.; MORAIS, L.E.; MENEZES-SILVA, P.E.; MAURI, R.; AVILA, R.T.; VITAL, C.E.; CARDOSO, A.A.; DaMATTA, F.M. How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees**, v. 33, n. 6, p. 1679-1693, 2019. DOI: 10.1007/s00468-019-01889-4

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D.R. **Cultura do café no Brasil: novo manual de recomendações**. Varginha: PROCAFÉ, 2005. 438p.

MAUREL, C.; NACRY, P. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. **Nature Plants**, v. 6, p. 744-749, 2020. DOI: 10.1038/s41477-020-0684-5

MENDES, K. R.; MARENCO, R. A.; NASCIMENTO, H. C. S. Velocidade de carboxilação da Rubisco e transporte de elétrons em espécies arbóreas em resposta a fatores do ambiente na Amazônia central. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 947-959, 2017. DOI: 10.5902/1980509828666.

MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.3-5. 2021. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. Acessado em: 05/04/21.

MENEZES-SILVA, P. E.; SANGLARD, L. M. P. V.; ÁVILA, R. T.; MORAIS, L. E.; MARTINS, S. C. V.; NOBRES, P.; PATREZE, C. M.; FERREIRA, M. A.; ARAÚJO, W. L.; FERNIE, A. R.; DAMATTA, F. M. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 15, p. 4309-4322, 2017. DOI:10.1093/jxb/erx211

MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Biochemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959. DOI: 10.1021/ac60147a030

- MITCHELL C. A. Measurement of photosynthetic gas exchange in controlled environments. **HortScience**, West Lafayette, v. 27, n. 7, p. 764-766, 1992.
- MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.L.; JACKSON, A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 562-564, 1982. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400030037x
- MONTÓRIO, G. A.; VELINI, E. D.; MACIEL, C. D. G.; MONTÓRIO, T. Eficiência dos surfatantes de uso agrícola na redução da tensão superficial. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.4, n.2, p. 8-22, 2005. DOI: 10.7824/rbh.v4i2.21
- MORISON, J. I. L.; BAKER, N. R.; MULLINEAUX, P. M.; DAVIES, W. J. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 639-658, 2008. DOI: 10.1098/rstb.2007.2175.
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, n. 2, p. 239-250, 2002. DOI: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x.
- OGLE, D. H.; WHEELER, P.; DINNO, A. **FSA**: fisheries stock analysis. R package version 0.8.31. 2020. Disponível em: <<https://github.com/droglenc/FSA>>. Acessado em: 05/04/21.
- PARADISONE, V.; NAVARRO-LEÓN, E.; RUIZ, J. M.; ESPOSITO, S.; BLASCO, B. Calcium silicate ameliorates zinc deficiency and toxicity symptoms in barley plants through improvements in nitrogen metabolism and photosynthesis. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 12, 2021. DOI: 10.1007/s11738-021-03325-y
- PARRY, M. A. J.; FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Prospects for crop production under drought: research priorities and future directions. **Annals of Applied Biology**, v. 147, n. 3, p. 211-226, 2005. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2005.00032.x.
- PEREIRA, T. A.; ALVES, J. D.; ABRAHÃO, S. A.; ABRAHÃO, J. E.; FRIES, D. D.; LIVRAMENTO, D. E.; DEUNER, S. Carboidratos, redutase do nitrato e restabelecimento de mudas “passadas” de cafeeiros após a poda em diferentes alturas. **Revista Ceres**, v. 55, n. 3, p. 236-242, 2008.
- POHLERT, T. **PMCMRplus**: calculate pairwise multiple comparisons of mean rank sums extended. R package version 1.7.1. 2020. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=PMCMRplus>>. Acessado em: 05/04/21.
- QADERI, M. M.; KUREPIN, L. V.; REID, D. M. Growth and physiological responses of canola (*Brassica napus*) to three components of global climate change: temperature, carbon dioxide and drought. **Physiologia Plantarum**, v. 128, p. 710-721, 2006. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2006.00804.x
- REHAGRO - Blog. **Cultivares de café**: qual escolher? 2020. Disponível em: <<https://rehagro.com.br/blog/cultivares-de-cafe-qual-escolher/>> Acesso em: 11 de outubro de 2021.

REICH, P. B.; SENDALL, K. M.; STEFANSKI, A.; WEI, X.; RICH, R. L.; MONTGOMERY, R. A. Boreal and temperate trees show strong acclimation of respiration to warming. **Nature**, v. 531, n. 31, p. 633-638, 2016. DOI: 10.1038/nature17142

ROHÁČEK, K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. **Photosynthetica**, v. 40, p. 13-29, 2002. DOI: 10.1023/A:1020125719386

ROSA, M.; PRADO, C.; PODAZZA, G.; INTERDONATO, R.; GONZÁLEZ, J. A.; HILAL, M.; PRADO, F. E. Soluble sugars - metabolism, sensing and abiotic stress: a complex network in the life of plants. **Plant Signalling & Behavior**, v. 4, n. 5, p. 388-393, 2009. DOI: 10.4161/psb.4.5.8294

SALIENDRA, N. Z.; MEINZER, F. C. Genotypic, developmental and drought-induced differences in root hydraulic conductance of contrasting sugarcane cultivars. **Journal of Experimental Botany**, v. 43, n. 9, p. 1209-1217, 1992. DOI: 10.1093/jxb/43.9.1209

SANTINATO, R.; SILVA, V.A. **Tecnologias para produção de mudas de café**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001. 116p.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.J.; BRADSTREET, A.; HEMMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965. DOI: 10.1126/science.148.3668.339

SENAR - Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Café: construção de viveiros e produção de mudas**. Brasília: SENAR, 1ª ed. 2017. 72 p.

SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P. **Plant photosynthetic production: Manual of methods**. W. Junk, The Hague, Netherlands. 1971.

SHARP, R. E. Interaction with ethylene: Changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, n. 2, p. 211-222, 2002. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2002.00798.x.

SICHER, R. C.; TIMLIN, D.; BAILEY, B. Responses of growth and primary metabolism of water-stressed barley roots to rehydration. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, n. 7, p. 686-695, 2012. DOI: 10.1016/j.jplph.2012.01.002

SILVA, J. C.; ALVES, J. D.; ALVARENGA, A. A.; MAGALHÃES, M. M.; LIVRAMENTO, D. E.; FRIES, D. D. Invertase and sucrose synthase activities in coffee plants sprayed with sucrose solution. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 2, p. 239-244, 2003. DOI: 10.1590/S0103-90162003000200006

TANG, B.; HORIKOSHI, M.; LI, W. ggfortify: Unified Interface to Visualize Statistical Results of Popular R Packages. **The R Journal**, v.8, n. 2, p. 474-485, 2016. DOI: 10.32614/RJ-2016-060.

TAYLOR, A.A.; DE-FELICE, J.; HAVILL, D.C. Nitrogen metabolism in *Poterium sanguisorba* during water stress. **New Phytologist**, v. 90, n. 1, p. 19-25, 1982. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1982.tb03236.x

TRÄNKNER, M.; TAVAKOLB, E.; JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 414-431, 2018. DOI: 10.1111/ppl.12747

TRÄNKNER, M., JAGHDANI, S. J. Minimum magnesium concentrations for photosynthetic efficiency in wheat and sunflower seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 144, p. 234-243, 2019. DOI: 10.1016/j.plaphy.2019.09.040

VANDEGEER, R. K.; CIBILS-STEWART, X.; WUHRER, R.; HARTLEY, S. E.; TISSUE, D. T.; JOHNSON, S. N. Leaf silicification provides herbivore defence regardless of the extensive impacts of water stress. **Functional Ecology**, v. 35, n. 6, p. 1200-1211, 2021. DOI: 10.1111/1365-2435.13794

VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, n. 4, p. 523-539, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x

WANG, J.; CHEN, Y.; WANG, P.; LI, Y.S.; WANG, G.; LIU, P.; KHAN, A. Leaf gas exchange, phosphorus uptake, growth and yield responses of cotton cultivars to different phosphorus rates. **Photosynthetica**, v. 56, p. 1414-1421, 2018. DOI: 10.1007/s11099-018-0845-1

WEI, T.; SIMKO, V.R. **Package “corrplot”**: Visualization of a correlation matrix (Version 0.84). 2017. Disponível em: <<https://github.com/taiyun/corrplot>>. Acessado em: 10/04/21.

YAN, B.; WU, B.; GAO, Y.; WU, J.; NIU, J.; XIE, Y.; CUI, Z.; ZHANG, Z. Effects of nitrogen and phosphorus on the regulation of nonstructural carbohydrate accumulation, translocation and the yield formation of oilseed flax. **Field Crops Research**, v. 219, p. 229-241, 2018. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.01.032

YEMM, E. W.; WILLIS, A.J. The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. **The Biochemical Journal**, v. 57, n. 3, p. 508-514, 1954. DOI: 10.1042/bj0570508

ZANANDREA, I.; ALVES, J. D.; DEUNER, S.; GOULART, P. F. P.; HENRIQUE, P. de C.; SILVEIRA, N. M. Tolerance of *Sesbania virgata* plants to flooding. **Australian Journal of Botany**, v. 57, n. 8, p. 661-669, 2010. DOI: 10.1071/BT09144

ZHANG, J. X.; NGUYEN, H. T.; BLUM, A. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 332, p. 291-302, 1999. DOI: 10.1093/jexbot/50.332.291.

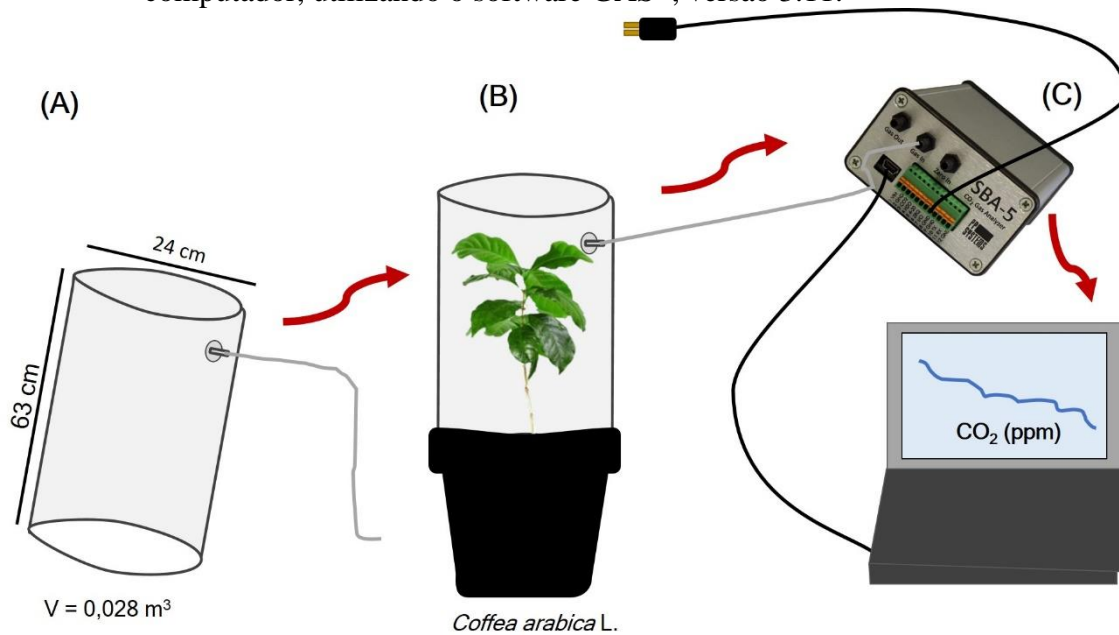
ZHANG, L.; YAN, M.; LI, H.; REN, Y.; SIDDIQUE, K. H.; CHEN, Y.; ZHANG, S. Effects of zinc fertilizer on maize yield and water-use efficiency under different soil water conditions. **Field Crops Research**, v. 248, n. 1, p. 1-11, 2020. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107718

ZHOU, H.; ZHOU, G.; HE, Q. ZHOU, L.; JI, Y.; ZHOU, M. Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes. **Environmental and Experimental Botany**, v. 171, p. 1-10, 2020. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103932

ZHU, J.; TREMBLAY, T.; LIANG, Y. Comparing SPAD and atLEAF values for chlorophyll assessment in crop species. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 92, n. 4, p. 645-648, 2012. DOI: 10.4141/CJSS2011-100

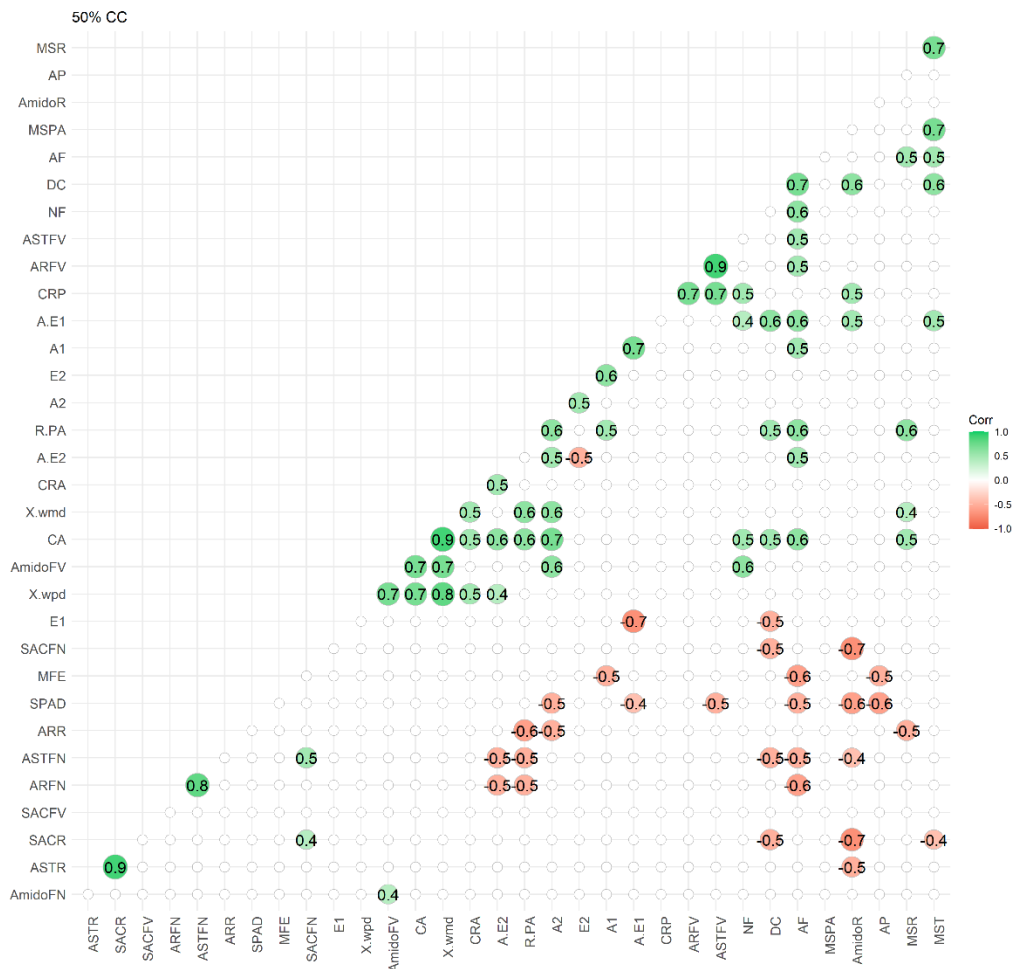
ANEXOS

Figura A1 - Representação esquemática da câmara que foi construída para análise de assimilação de CO_2 (A) e transpiração (E) [A], considerando todas as folhas do dossel vegetativo; câmara cobrindo o dossel vegetativo da planta (sistema fechado) [B] e analisador de gases por infravermelho (SBA-5, PP Systems, EUA) [C], com uma fonte conectada à energia elétrica, recebe a mangueira de conexão do sistema fechado e envia a informação da concentração de CO_2 , água, temperatura do ar e da água e pressão de vapor dentro do sistema fechado, para o computador, utilizando o software GAS[®], versão 3.11.



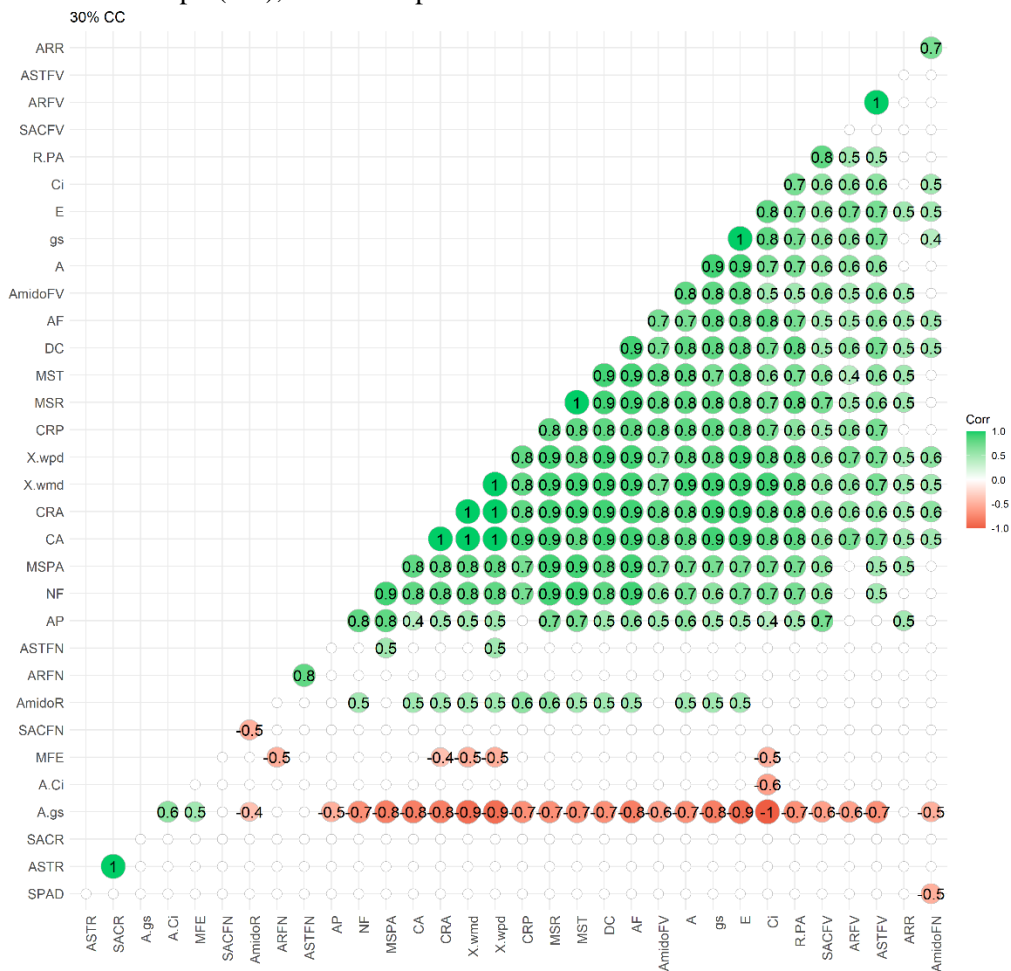
Fonte: do autor (2021).

Figura A2 - Análise de correlação ($p < 0,05$), do consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$, X.wmd) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$, X.wpd), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), índice SPAD (SPAD), assimilação de CO_2 da planta inteira, análise 1 e 2 (A_1 e A_2), transpiração, análise 1 e 2 (E_1 e E_2), eficiência do uso da água, análise 1 e 2 (EUA_1 e EUA_2 , A.E1 e A.E2), açúcares redutores em folha nova (AR_{FN}), folha velha (AR_{FV}) e raiz (AR_R), açúcares solúveis totais em folha nova (AST_{FN}), folha velha (AST_{FV}) e raiz (AST_R) e amido em folha nova (AmidoFN), folha velha (AmidoFV) e raiz (AmidoR), sacarose em folha nova (SAC_{FN}), folha velha (SAC_{FV}) e raiz (SAC_R), massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação raiz/parte aérea (R/PA, R.PA), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], no momento de avaliação de 50% da capacidade de campo (CC), definido a partir da intensidade do estresse.



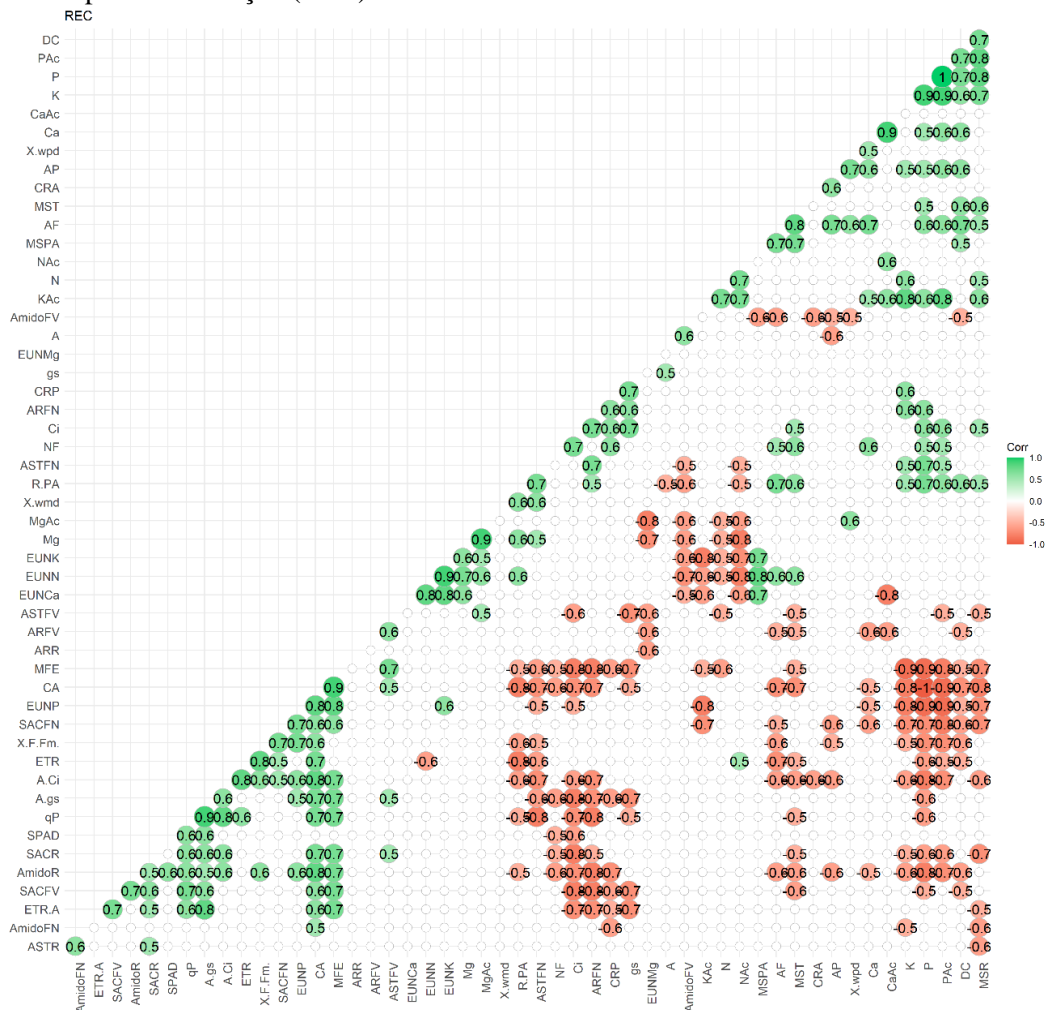
Fonte: do autor (2021).

Figura A3 - Análise de correlação ($p < 0,05$), do consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$, X.wmd) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$, X.wpd), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), índice SPAD (SPAD), assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração intercelular de CO_2 (Ci) e eficiência intrínseca do uso da água (EUAi, A.Ci), eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), açúcares redutores em folha nova (AR_{FN}), folha velha (AR_{FV}) e raiz (AR_R), açúcares solúveis totais em folha nova (AST_{FN}), folha velha (AST_{FV}) e raiz (AST_R) e amido em folha nova (AmidoFN), folha velha (AmidoFV) e raiz (AmidoR), sacarose em folha nova (SAC_{FN}), folha velha (SAC_{FV}) e raiz (SAC_R), massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação raiz/parte aérea (R/PA, R.PA), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], no momento de avaliação de 30% da capacidade de campo (CC).

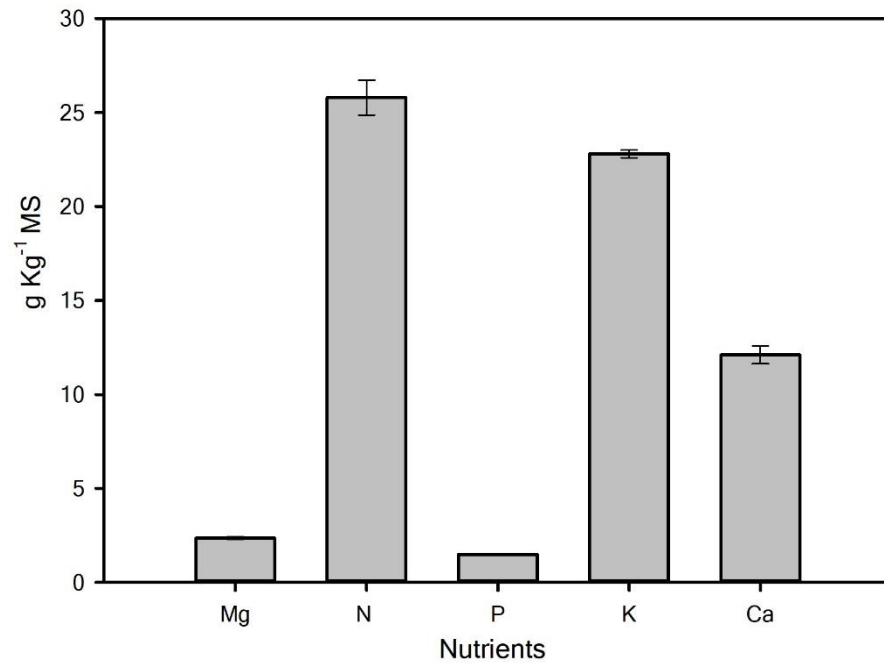


Fonte: do autor (2021).

Figura A4 - Análise de correlação ($p < 0,05$), do consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$, X.wmd) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$, X.wpd), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), índice SPAD (SPAD), assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (gs), concentração intercelular de CO₂ (Ci) e eficiência intrínseca do uso da água (EUAi, A.gs), eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci, A.Ci), taxa aparente de transporte de elétrons (ETR), eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/Fm'$, X.F.Fm.), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A, ETR.A), açúcares redutores em folha nova (AR_{FN}), folha velha (AR_{FV}) e raiz (AR_R), açúcares solúveis totais em folha nova (AST_{FN}), folha velha (AST_{FV}) e raiz (AST_R) e amido em folha nova (Amido_{FN}), folha velha (Amido_{FV}) e raiz (Amido_R), sacarose em folha nova (SAC_{FN}), folha velha (SAC_{FV}) e raiz (SAC_R), massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação raiz/parte aérea (R/PA, R.PA), e teores foliar de magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca), acúmulo foliar de magnésio (Mg_{Ac}), nitrogênio (N_{Ac}), fósforo (P_{Ac}), potássio (K_{Ac}) e cálcio (Ca_{Ac}), e eficiência no uso do nutriente (EUN), de magnésio (EUN_{Mg}), nitrogênio (EUN_N), fósforo (EUN_P), potássio (EUN_K) e cálcio (EUN_{Ca}), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], após a reidratação (REC).



Fonte: do autor (2021).

Figura A5 - Teor de nutrientes nas folhas de mudas de cafeeiro antes da aplicação dos tratamentos.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 1 - Resultado da análise química do substrato homogêneo (solo + areia) utilizado no experimento.

pH	K P Na			Ca Mg			Al		H+Al			
	----- mg dm ⁻³ -----						----- cmol _c dm ⁻³ -----					
5,7	29,00	3,00	-	0,70	0,20		0,10		2,80			
SB	t	T	V	m	M.O.	P-Rem	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
-----cmol _c dm ⁻³ -----			----- % -----		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹			----- mg dm ⁻³ -----			
0,97	1,07	3,77	25,85	9,35	1,00	21,00	1,50	44,60	17,10	2,20	0,06	12,00

pH em água, KCl e CaCl₂ - Relação 1:2,5

Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L

SB= Soma de Bases Trocáveis

CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0

m= Índice de Saturação de Alumínio

P-rem: Fósforo Remanescente

S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético

P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrator Mehlich 1

H + Al- Extrator: SMP

CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

V= Índice de Saturação de Bases

Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N+ H₂SO₄ 10N

B- Extrator água quente

Fonte: do autor (2021).

Tabela 2 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), do consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), comprimento de ramos plagiotrópicos (CRP), área foliar (AF), massa foliar específica (MFE), índice SPAD (SPAD) e assimilação de CO₂ da planta inteira, análise 1 (A_I), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC		
	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
	----- Valor de p -----			----- Valor de p -----			----- Valor de p -----		
CA	1,0596	28,8490	0,8227	7,2507	23,0530	0,8039	1,7646	11,0250	0,8044
	0,3883	0,0000	0,0007	0,0018	0,0000	0,0003	0,1863	0,0116	0,0003
$\Psi_{w_{md}}$	0,7864	3,3653	0,8823	3,0496	8,6746	0,8230	0,0340	0,4365	0,9175
	0,5189	0,3387	0,0195	0,0523	0,0339	0,0007	0,9913	0,9326	0,0514
$\Psi_{w_{pd}}$	0,2083	4,9541	0,8188	4,9196	18,4440	0,7510	0,3604	2,9438	0,8317
	0,8891	0,1752	0,0017	0,0101	0,0003	0,0000	0,7823	0,4004	0,0010
CRA	1,4847	3,0525	0,9423	4,2249	17,1160	0,8209	3,4038	6,6763	0,9454
	0,2490	0,3836	0,1833	0,0182	0,0007	0,0007	0,0377	0,0829	0,2154
AP	4,8315	5,7132	0,9164	0,5774	0,9296	0,9684	1,1270	5,9379	0,9146
	0,0109	0,1264	0,0486	0,6366	0,8183	0,6281	0,3619	0,1147	0,0445
DC	0,4784	2,6767	0,9848	0,0044	0,0869	0,9568	0,1140	1,4702	0,9629
	0,7009	0,4442	0,9657	0,9996	0,9934	0,3772	0,9509	0,6892	0,4997
NF	1,6478	6,6696	0,9075	0,3104	2,5890	0,9672	0,2238	0,4489	0,9206
	0,2102	0,0832	0,0311	0,8176	0,4594	0,5994	0,8787	0,9300	0,0603
CRP	0,2446	0,8778	0,9744	0,6753	1,7340	0,9501	0,8701	1,4858	0,9696
	0,8641	0,8308	0,7742	0,5778	0,6294	0,2938	0,4730	0,6855	0,6565
AF	1,2580	6,4093	0,9756	0,5036	2,9643	0,9095	0,2097	2,0634	0,9507
	0,3155	0,0933	0,8024	0,6842	0,3972	0,0345	0,8885	0,5593	0,2811
MFE	1,5334	5,7180	0,9171	0,5385	1,0968	0,9748	0,3617	1,4323	0,9573
	0,2367	0,1262	0,0505	0,6614	0,7778	0,7841	0,7813	0,6980	0,3875
SPAD	0,2829	4,7925	0,9431	0,3421	1,4700	0,9609	0,3474	1,2521	0,9418
	0,8371	0,1876	0,1916	0,7951	0,6892	0,4576	0,7914	0,7405	0,1789
A_I	1,3902	3,8395	0,8796	---	---	---	---	---	---
	0,2819	0,2793	0,0174	---	---	---	---	---	---

*Valor de $p < 0.05$ (Em **negrito**) = dados que não apresentam homogeneidade das variâncias/não seguem distribuição normal.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 3 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), da assimilação de CO₂ da planta inteira, análise 2 (A₂), transpiração, análise 1 e 2 (E₁ e E₂), eficiência do uso da água, análise 1 e 2 (EUA₁ e EUA₂), assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração intercelular de CO₂ (C_i), eficiência intrínseca do uso da água (EUA_i), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC		
	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
	Valor de p			Valor de p			Valor de p		
A ₂	0,3093	0,5121	0,9668	---	---	---	---	---	---
	0,8184	0,9162	0,6858	---	---	---	---	---	---
E ₁	1,3764	6,7229	0,9314	---	---	---	---	---	---
	0,2859	0,0813	0,1643	---	---	---	---	---	---
E ₂	0,0900	0,1506	0,9742	---	---	---	---	---	---
	0,9645	0,9851	0,8396	---	---	---	---	---	---
EUA ₁	2,0941	6,1667	0,9586	---	---	---	---	---	---
	0,1413	0,1038	0,5153	---	---	---	---	---	---
EUA ₂	0,9775	4,7669	0,9671	---	---	---	---	---	---
	0,4279	0,1897	0,6928	---	---	---	---	---	---
A	---	---	---	0,4580	1,2890	0,9799	0,5305	1,0785	0,9569
	---	---	---	0,7154	0,7318	0,9336	0,6665	0,7823	0,3802
g _s	---	---	---	2,4397	20,1420	0,8716	1,1921	1,9829	0,9303
	---	---	---	0,1021	0,0002	0,0126	0,3381	0,5760	0,0992
E	---	---	---	1,5694	10,2680	0,8890	1,6654	2,1221	0,9632
	---	---	---	0,2357	0,0164	0,0258	0,2064	0,5475	0,5072
C _i	---	---	---	4,6407	9,7873	0,8895	0,0429	0,1964	0,9416
	---	---	---	0,0161	0,0204	0,0263	0,9878	0,9782	0,1772
EUA _i	---	---	---	6,0285	11,6940	0,8963	0,0445	0,3431	0,9329
	---	---	---	0,0060	0,0085	0,0351	0,9872	0,9517	0,1137
A/C _i	---	---	---	1,6694	31,5610	0,5164	0,5705	1,1358	0,9012
	---	---	---	0,2135	0,0000	0,0000	0,6409	0,7684	0,0229
ETR	---	---	---	---	---	---	1,3016	3,742	0,9459
	---	---	---	---	---	---	0,3082	0,3375	0,3092

*Valor de p < 0.05 (Em negrito) = dados que não apresentam homogeneidade das variâncias/não seguem distribuição normal.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 4 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), da eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/Fm'$), coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência (qP), relação entre o transporte aparente de elétrons e a assimilação de CO₂ (ETR/A), açúcares redutores em folha nova (AR_{FN}), folha velha (AR_{FV}) e raiz (AR_R), açúcares solúveis totais em folha nova (AST_{FN}), folha velha (AST_{FV}) e raiz (AST_R), e amido em folha nova (AmidoFN), folha velha (AmidoFV) e raiz (AmidoR), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC		
	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
	----- Valor de p -----			----- Valor de p -----			----- Valor de p -----		
$\Delta F/Fm'$	---	---	---	---	---	---	0,9091	1,3710	0,8507
qP	---	---	---	---	---	---	0,4542	0,7123	0,0023
ETR/A	---	---	---	---	---	---	0,6773	1,5706	0,9729
AR_{FN}	0,8662	3,6635	0,9835	0,4136	3,0920	0,9422	0,5761	0,6661	0,7392
AR_{FV}	0,4749	0,3002	0,9510	1,4673	5,9053	0,9321	1,4659	8,2982	0,9222
AR_R	0,6563	0,5733	0,9536	0,2551	0,1163	0,1212	0,2613	0,0402	0,1092
AST_{FN}	0,5932	0,9025	0,5160	0,5598	2,6187	0,9567	1,1353	3,3617	0,9406
AST_{FV}	0,0839	0,1098	0,9744	0,6477	0,4542	0,3764	0,3614	0,3391	0,2035
AST_R	0,9679	0,9906	0,8274	0,3458	4,4757	0,8984	1,6487	5,2297	0,9334
AmidoFN	1,3189	5,4930	0,9385	0,7926	0,2145	0,0234	0,2100	0,1557	0,1160
AmidoFV	0,2960	0,1391	0,1511	1,6304	7,8045	0,9144	0,9168	1,4862	0,9704
AmidoR	0,4305	1,2664	0,9727	0,2157	0,0502	0,0507	0,4526	0,6855	0,7207
	0,7557	2,1468	0,9504	0,4487	3,0016	0,9083	0,6625	3,1343	0,9419
	0,5320	0,5425	0,2761	0,7210	0,3914	0,0324	0,5858	0,3714	0,2173
	0,2474	0,9269	0,9403	1,0372	4,7732	0,8712	0,8504	4,2984	0,9520
	0,8622	0,8189	0,1657	0,3975	0,1892	0,0056	0,4827	0,2310	0,2992
	0,7087	1,3258	0,9580	1,7670	3,2283	0,9393	0,8850	0,8606	0,9471
	0,5593	0,7230	0,4502	0,1916	0,3578	0,2107	0,4666	0,8349	0,2547
	5,3951	6,1820	0,9603	1,6237	4,7850	0,9747	0,6367	0,7266	0,9042
	0,0074	0,1031	0,4689	0,2155	0,1882	0,7824	0,1128	0,7697	0,9546
							0,9516	0,8567	0,3396
							0,4586	1,8806	0,9611
							0,7144	0,5975	0,4866

*Valor de $p < 0.05$ (Em **negrito**) = dados que não apresentam homogeneidade das variâncias/não seguem distribuição normal.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 5 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), de sacarose em folha nova (SAC_{FN}), folha velha (SAC_{FV}) e raiz (SAC_R), e teores foliar de magnésio (Mg), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca), e acúmulo foliar de magnésio (Mg_{Ac}), nitrogênio (N_{Ac}), fósforo (P_{Ac}) e potássio (K_{Ac}), de mudas de cafeeiros submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC		
	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
	----- Valor de p -----			----- Valor de p -----			----- Valor de p -----		
SAC _{FN}	0,5464	0,7937	0,9362	0,7784	4,4306	0,9599	0,6757	2,5905	0,9290
	0,6576	0,8510	0,2034	0,5221	0,2186	0,5151	0,5795	0,4592	0,1478
SAC _{FV}	0,1608	0,8137	0,8798	1,2777	3,4277	0,8491	2,9006	5,5748	0,9411
	0,9212	0,8462	0,0145	0,3264	0,3303	0,0132	0,0652	0,1342	0,2295
SAC _R	0,8989	3,1026	0,9336	0,4618	3,8527	0,9243	0,9683	0,9377	0,9514
	0,4621	0,3761	0,1629	0,7121	0,2778	0,0728	0,4292	0,8163	0,3368
Mg	---	---	---	---	---	---	0,1583	1,1098	0,9210
	---	---	---	---	---	---	0,9214	0,7747	0,2943
N	---	---	---	---	---	---	0,4416	3,1580	0,8837
	---	---	---	---	---	---	0,7296	0,3679	0,0980
P	---	---	---	---	---	---	0,7928	3,6874	0,8659
	---	---	---	---	---	---	0,5313	0,2973	0,0581
K	---	---	---	---	---	---	0,5237	2,6155	0,8856
	---	---	---	---	---	---	0,6780	0,4548	0,1035
Ca	---	---	---	---	---	---	0,2693	2,3867	0,9264
	---	---	---	---	---	---	0,8459	0,4961	0,3433
Mg _{Ac}	---	---	---	---	---	---	0,3134	0,9322	0,9544
	---	---	---	---	---	---	0,8154	0,8177	0,7015
N _{Ac}	---	---	---	---	---	---	0,2110	1,8406	0,9174
	---	---	---	---	---	---	0,8860	0,6061	0,2654
P _{Ac}	---	---	---	---	---	---	0,6343	2,1913	0,8922
	---	---	---	---	---	---	0,6135	0,5337	0,1258
K _{Ac}	---	---	---	---	---	---	0,2464	0,7987	0,9601
	---	---	---	---	---	---	0,8617	0,8498	0,7847

*Valor de **p** < **0.05 (Em negrito)** = dados que não apresentam homogeneidade das variâncias/não seguem distribuição normal.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 6 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk), do acúmulo foliar de cálcio (Ca_{Ac}), eficiência no uso do nutriente (EUN), de magnésio (EUN_{Mg}), nitrogênio (EUN_N), fósforo (EUN_P), potássio (EUN_K) e cálcio (EUN_{Ca}), massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST), relação raiz/parte aérea (R/PA) e índice de tolerância ao estresse, pela massa seca da raiz (ITS_{MSR}) e total (ITS_{MST}), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC		
	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
	----- Valor de p -----			----- Valor de p -----			----- Valor de p -----		
Ca_{Ac}	---	---	---	---	---	---	0,2950	1,3844	0,9189
	---	---	---	---	---	---	0,8281	0,7092	0,2772
EUN_{Mg}	---	---	---	---	---	---	1,8289	9,2568	0,9575
	---	---	---	---	---	---	0,1956	0,0261	0,6167
EUN_N	---	---	---	---	---	---	5,0094	8,1845	0,8206
	---	---	---	---	---	---	0,0177	0,0523	0,0502
EUN_P	---	---	---	---	---	---	3,0316	9,0321	0,8916
	---	---	---	---	---	---	0,0710	0,0289	0,0592
EUN_K	---	---	---	---	---	---	1,4511	7,5320	0,8428
	---	---	---	---	---	---	0,2770	0,0567	0,0507
EUN_{Ca}	---	---	---	---	---	---	2,6790	2,3026	0,9267
	---	---	---	---	---	---	0,0941	0,5120	0,2163
MSPA	0,2984	0,9816	0,8923	0,1677	1,3775	0,9535	0,6799	4,6227	0,9677
	0,8262	0,8057	0,0148	0,9169	0,7108	0,3227	0,5746	0,2016	0,6115
MSR	1,3788	6,3533	0,9554	0,2595	0,7853	0,9359	0,6037	2,4355	0,9562
	0,2781	0,0956	0,3534	0,8537	0,8530	0,1319	0,6202	0,4871	0,3676
MST	0,2567	0,3254	0,9050	0,0716	0,4041	0,9613	0,3732	3,3556	0,9561
	0,8556	0,9552	0,0276	0,9745	0,9394	0,4660	0,7732	0,3400	0,3661
R/PA	1,0224	2,9072	0,9782	0,6008	3,6491	0,9380	0,0728	1,4341	0,9768
	0,4037	0,4062	0,8607	0,6220	0,3019	0,1474	0,9739	0,6976	0,8302
ITS_{MSR}	0,0006	0,0877	0,9696	1,0287	1,8430	0,9503	---	---	---
	0,9807	0,7671	0,9068	0,3344	0,1746	0,6419	---	---	---
ITS_{MST}	0,1210	0,0012	0,8753	0,0022	0,0408	0,9777	---	---	---
	0,7352	0,9722	0,0763	0,9636	0,8399	0,9728	---	---	---

*Valor de $p < 0.05$ (Em negrito) = dados que não apresentam homogeneidade das variâncias/não seguem distribuição normal.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 7 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk) após a transformação dos dados, consumo de água (CA), potencial hídrico foliar ao meio dia ($\Psi_{w_{md}}$) e ao amanhecer ($\Psi_{w_{pd}}$), conteúdo relativo de água (CRA), altura de planta (AP), número de folhas (NF), área foliar (AF), assimilação de CO₂ da planta inteira, análise 1 (A_l), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e concentração intercelular de CO₂ (C_i), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC					
	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
		----- Valor de p -----				----- Valor de p -----				----- Valor de p -----		
CA	NA	---	---	---	NA	---	---	---	NA	---	---	---
$\Psi_{w_{md}}$	NA	---	---	---	NA	---	---	---	---	---	---	---
$\Psi_{w_{pd}}$	$\log(x)$	0,6928 0,5697	1,1285 0,7702	0,9336 0,1815	NA	---	---	---	NA	---	---	---
CRA	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
AP	---	---	---	---	---	---	---	---	\sqrt{x}	1,0917 0,3755	5,5106 0,1380	0,9239 0,0712
NF	\sqrt{x}	1,1765 0,3436	6,0971 0,1070	0,9227 0,0670	---	---	---	---	---	---	---	---
AF	---	---	---	---	$\log(x)$	0,2403 0,8672	1,1428 0,7668	0,9296 0,0955	---	---	---	---
A_l	NA	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
g_s	---	---	---	---	$\log(x)$	1,0515 0,3970	7,9447 0,0472	0,9315 0,1649	---	---	---	---
E	---	---	---	---	\sqrt{x}	0,5391 0,6623	3,1913 0,3631	0,9140 0,0761	---	---	---	---
C_i	---	---	---	---	NA	---	---	---	---	---	---	---

*NA = Nenhuma transformação adequada.

Fonte: do autor (2021).

Tabela 8 - Teste de homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk) após a transformação dos dados, da eficiência intrínseca do uso da água (EUA_i), eficiência instantânea de carboxilação (*A/Ci*), eficiência quântica efetiva do FS II ($\Delta F/Fm'$), açúcares solúveis totais em folha nova (AST_{FN}) e raiz (AST_R), amido em folha nova (AmidoFN), sacarose em folha velha (SAC_{FV}), massa seca da parte aérea (MSPA) e total (MST), de mudas de cafeeiro submetidas a duas suplementações de Mg foliar (Sem, Mg0% e Com, Mg2%) e duas condições hídricas [hidratado (H) e déficit hídrico (DH)], em três momentos de avaliação, definidos a partir da intensidade do estresse [50 e 30% da capacidade de campo (CC)] e reidratação (REC).

Variável	50% da CC			30% da CC			REC					
	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk	Transformação utilizada	Levene	Bartlett	Shapiro-Wilk
		----- Valor de p -----				----- Valor de p -----				----- Valor de p -----		
EUA _i	---	---	---	---	\sqrt{x}	2,9652 0,0635	5,6083 0,1323	0,9284 0,1439	---	---	---	---
<i>A/Ci</i>	---	---	---	---	NA	---	---	---	\sqrt{x}	0,4056 0,7506	1,5107 0,6798	0,9290 0,0926
$\Delta F/Fm'$	---	---	---	---	---	---	---	---	\sqrt{x}	0,5249 0,6701	0,9953 0,8024	0,9236 0,0703
AST _{FN}	---	---	---	---	$\log(x)$	0,2962 0,8277	2,6375 0,4510	0,9567 0,4005	---	---	---	---
AST _R	---	---	---	---	\sqrt{x}	0,2424 0,8657	0,8674 0,8333	0,9389 0,1538	---	---	---	---
AmidoFN	---	---	---	---	$\log(x + 1)$	0,6742 0,5779	2,0619 0,5597	0,9395 0,1588	---	---	---	---
SAC _{FV}	NA	---	---	---	$\log(x)$	1,9826 0,1704	2,8599 0,4137	0,9823 0,9793	---	---	---	---
MSPA	NA	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
MST	$\log(x)$	0,2530 0,8582	0,2070 0,9764	0,9239 0,0713	---	---	---	---	---	---	---	---

*NA = Nenhuma transformação adequada.

Fonte: do autor (2021).