

**CÉSAR AUGUSTO AVELLANEDA BOHÓRQUEZ**

**ABSORÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO POR CULTIVARES DE  
CAFÉ SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO**

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

Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez

Coorientadores: Paulo Roberto Cecon  
Kacilda Naomi Kuki

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**

**2019**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Avellaneda Bohórquez, César Augusto, 1982-

A949a  
2019

Absorção e eficiência de uso de nitrogênio por cultivares de  
café submetidas a deficit hídrico / César Augusto Avellaneda  
Bohórquez. – Viçosa, MG, 2019.

101 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Herminia Emilia Prieto Martinez.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Café - Nutrição. 2. Deficit hídrico. 3. Nitrogênio.  
4. Fotossíntese. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em  
Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 633.73894

**CÉSAR AUGUSTO AVELLANEDA BOHÓRQUEZ**

**ABSORÇÃO E EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO POR CULTIVARES DE  
CAFÉ SUBMETIDAS A DÉFICIT HÍDRICO**

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

APROVADA: 26 de setembro de 2019.

Assentimento:

César Avellaneda B.

---

César Augusto Avellaneda Bohórquez

Autor

Hermínia E. P. Martínez

---

Hermínia Emília Prieto Martínez

Orientadora

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Viçosa, por ter me dado a oportunidade de estudar o curso de Pós-graduação e pelos benefícios que recebi, ao ser tratado como mais uma pessoa da comunidade acadêmica, independentemente de minha condição de estrangeiro.

Ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar o doutorado no seu programa.

À Professora Hermínia Emília Prieto Martinez, pela orientação, a paciência e a confiança que depositou em mim, durante o desenvolvimento da pesquisa. Assim, como dos momentos e conversas compartilhadas.

Ao Professor Paulo Roberto Cecon, pela coorientação e pela disposição que sempre teve para me colaborar nos assuntos estatísticos.

A Dra. Kacilda Naomi Kuki por sua lucidez e simplicidade com que me passou as informações sobre os assuntos da fisiologia, é uma clara luz no caminho, grande abraço.

Às maravilhosas pessoas que conheci no Brasil e que de alguma forma me acompanharam durante minha estadia aqui no Brasil, especialmente à Diego, Liseth, Agnaldo e Thalita.

Finalmente, à minha família, as pessoas mais importantes na minha vida, sua presença sempre foi um incentivo para mim, especialmente a minha mãe me acompanhando na distância.

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

## RESUMO

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Absorção e eficiência de uso de nitrogênio por cultivares de café submetidas a déficit hídrico.** Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Kacilda Naomi Kuki.

As mudanças climáticas e a ampliação da fronteira agrícola para solos de baixa fertilidade têm motivado pesquisas para entender os efeitos dos déficits abióticos sobre a performance dos genótipos de café, visando identificar materiais com algum grau de tolerância. Neste trabalho objetivou-se foi avaliar as diferenças entre cultivares relacionadas a eficiência nutricional, trocas gasosas e fluorescência da clorofila em condições contrastantes de disponibilidade de nitrogênio e hídrica (experimento 1), assim como estimar os parâmetros cinéticos de absorção de nitrato em diferentes fases fenológicas do cafeeiro (experimento 2). No experimento 1, realizado em sistema hidropônico, em casa de vegetação, foram avaliadas as respostas de 4 genótipos de café arábica de 6 meses de idade (Mundo Novo - MN, Catuaí Amarelo - CA, Catuaí Vermelho - CV e Acauã - A) ao déficit hídrico e doses alta e baixa de nitrogênio. Foi utilizado um esquema fatorial (4x2x4) em delineamento de blocos casualizados com 3 repetições, sendo os fatores: 4 cultivares, 2 doses de nitrogênio alta (7  $\mu\text{mol/L}$  - NA) e baixa (2,8  $\mu\text{mol/L}$  - NB) e 4 níveis de déficit hídricos na solução nutritiva (0, -0,4, -0,8 e -1,6 MPa) estabelecidos via adição de PEG (Polietileno glicol). As plantas foram coletadas para estimar matéria seca e teores de nitrogênio total na folha, caule e raízes e assim calcular os índices de eficiência nutricional. Medições de fotossíntese ( $A$ ), eficiência de carboxilação (EC) e eficiência do uso da água (EUA) e do parâmetro  $F_v/F_m$  da fluorescência da clorofila foram avaliados. As regressões em função do aumento dos déficits hídricos, mostraram que a eficiência de absorção no NA, aumentou para MN e CV, e para CA e A diminuiu. No NB as eficiências foram menores em relação a NA e aumentaram para MN, CA e A, não variando para CV. Para eficiência de utilização no NA, CV, CA e MN mostraram reduções conforme aumentaram os déficits hídricos, Acauã não variou. No NB as cultivares mostraram tendência de diminuição, exceto para MN que não variou. Pode-se concluir que MN foi a variedade que mostrou melhor desempenho quanto as eficiências de absorção e utilização tanto em adequada quanto em reduzida disponibilidade de nitrogênio, portanto, apresenta-se como adequada para esses ambientes. Em relação as trocas gasosas na dose NA a cultivar CV mostrou as menores reduções da  $A$ , EC e maiores valores de EUA em resposta ao déficit hídrico de -0,8 MPa. O parâmetro  $F_v/F_m$  nas cultivares não foi afetado pela imposição do déficit hídrico indicando que

não houve queda da eficiência fotoquímica, e que suplementação de nitrogênio não interferiu nesta resposta. Na dose de NB a cultivar Acauã mostrou menores reduções  $A$ , EC e EUA em resposta ao déficit hídrico de -0,4 e -1,6 MPa.  $F_v/F_m$  das cultivares também não foi afetado pelos déficits hídricos. Se conclui que CV na dose NA exibiu melhor desempenho das trocas gasosas e, Acauã foi menos impactada pelo déficit hídrico e baixa disponibilidade de nitrogênio. No experimento 2 foram utilizadas árvores de 5 anos de idade em condições de campo, nas fases fenológicas de chumbinho (Ch), expansão rápida (ER), granação (G) e maturação (M). Foram cavadas trincheiras e selecionadas raízes laterais para induzir produção de novas raízes finas, mediante instalação de câmara de crescimento com vermiculita, sendo esta retirada após um período de crescimento radicular e as raízes lavadas sem ser destacadas das plantas, para então iniciarem-se os ensaios de exaustão do nitrato; utilizando solução de exaustão com  $90 \mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  e volume conhecido. Os ensaios de exaustão foram iniciados três horas após o nascer do sol e foram encerrados por volta de 17 h. Nesse intervalo tomaram-se, a cada hora, amostras da solução de exaustão, para acompanhar a depleção de  $\text{NO}_3^-$ . Com os dados de transpiração, matéria fresca das raízes/planta e concentração de nitrato nas amostras foram calculados os parâmetros cinéticos de absorção  $V_{\text{max}}$ ,  $K_m$  e a taxa de absorção de  $\text{NO}_3^-$ . Foram utilizadas análises descritivas para apresentar os resultados. Os valores de  $V_{\text{max}}$  foram maiores na fase de (Ch) e (M). A taxa de absorção de nitrato foi maior na fase (ER) até  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ , com maior taxa de absorção na fase (M) acima dessa concentração e, com menor taxa na fase de (G).  $V_{\text{max}}$  só na fase (ER) teve correlação positiva com produção de frutos.  $K_m$  mostrou menor valor na fase de (ER) impactando positivamente taxa de absorção, com maiores valores na fase de (G) e ainda mais na (M). Conclui-se que as taxas de absorção de nitrato mostraram dependência das fases fenológicas, indicando que os mecanismos de absorção podem modular os parâmetros cinéticos em função das demandas diferenciais em cada fase.

Palavras-chave: Déficit hídrico. Nitrogênio. Eficiência nutricional. Fotossíntese.

## ABSTRACT

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2019. **Uptake and efficiency the use of nitrogen by coffee cultivars submitted to water stress.** Advisor: Herminia Emília Prieto Martinez. Co-advisors: Paulo Roberto Cecon and Kacilda Naomi Kuki.

Climate change and the expansion of the agricultural frontier to low fertility soils have motivated research to understand the effects of abiotic stresses on the performance of coffee genotypes to identify materials with some degree of tolerance. This research has as objective to evaluate the varietal differences related to nutritional efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in contrasting conditions of nitrogen and water availability (experiment 1), as well as to estimate the kinetic parameters of nitrate absorption in different phenological phases of coffee berry development (experiment 2). The experiment 1 was done in green house, under hydroponic system. Four 6-month-old arabica coffee genotypes (Mundo Novo - MN, Catuaí Amarelo - CA, Catuaí Vermelho - CV and Acauã - A) were submitted to water stress levels and high (NA) and low (NB) nitrogen doses. Was used a factorial scheme in experimental design randomized block (4x2x4) with 3 replications. The factors were: 4 cultivars, 2 nitrogen doses (NA and NB) and 4 levels of water deficits of the nutrient solution (0, -0.4, - 0.8 and -1.6 MPa) established via the addition of PEG (Polyethylene glycol). Plants were harvested to estimate dry matter and total nitrogen levels in leaf, stem and roots to calculate efficiency indexes. Photosynthesis (A), carboxylation efficiency (EC), water use efficiency (EUA) and fluorescence parameter  $F_v / F_m$  were evaluated. Regressions due to the increase of water deficit showed that the absorption efficiency in NA increased to MN and CV, and decreased to CA and A. In NB the efficiencies were lower in relation to NA and increased with deficit for MN, CA and A, not varying for CV. In NB all varieties showed lower decreasing efficiencies, except for MN that did not vary. It can be concluded that MN was the variety that showed the best performance regarding absorption, translocation and utilization efficiencies in both adequate and low nitrogen availability, therefore, it is promising. Regarding gas exchange at NA dose, the CA cultivar showed the lowest reductions in A, EC and highest EUA values in response to water deficit of -0.8 MPa. The  $F_v / F_m$  parameter in the cultivars was not affected by the imposition of water deficit indicating that there was no decrease in photochemical efficiency, and that nitrogen supplementation did not interfere with this response. At NB dose the Acauã cultivar showed smaller reductions A, EC and EUA in response to water deficit of -0.4 and -1.6 MPa.  $F_v / F_m$  of the cultivars was not affected by the

degree of water deficits imposed. It can be concluded that in NA dose, the CV showed better gas exchange performance and Acauã was less impacted by water deficit and low nitrogen availability. In experiment 2, 5-year-old trees were used under field conditions in the phenological phases of pin head fruit (PH), rapid expansion (RE), granation (G) and maturation (M). Trenches were dug and roots selected to induce production of new thin roots by installing a growth chamber with vermiculite, then removing and washing the roots, without detach them of the plant, to begin the nitrate exhaustion test; using  $90 \mu\text{mol L}^{-1}$  solution of  $\text{NO}_3^-$  and known volume. The exhaustion essays have began three hours after sun down and ended at about five PM. Along this time samples of the exhaustion solution were picked in an hour base. With transpiration data, the fresh weight of roots / plant, and nitrate concentration in the samples the absorption kinetic parameters  $V_{\text{max}}$ ,  $K_m$  and  $\text{NO}_3^-$  absorption rate were calculated. Descriptive analysis was used to present the results.  $V_{\text{max}}$  values were higher at (PH) and (M) phase. Nitrate absorption rate was higher in phase (RE) up to  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ , with higher absorption rate in phase (M) above this concentration and with lower rate in phase (G).  $V_{\text{max}}$  only in the phase (RE) had a positive correlation with fruit production.  $K_m$  showed lower value in (RE) phase positively affecting absorption rate, with higher values in (G) and even more in (M). It was concluded that nitrate absorption rates showed dependence on phenological phases, indicating that absorption mechanisms can modulate kinetic parameters as a function of differential demands in each phase.

Keywords: Water déficit. Nitrogen. Nutritional efficiency. Photosynthesis.



## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

#### **EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DO NITROGÊNIO EM CAFEIEIRO SUBMETIDO A DÉFICIT HÍDRICO ..... 10**

RESUMO ..... 11

ABSTRACT ..... 12

1 INTRODUÇÃO ..... 13

2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 17

2.1 Material vegetal e condições de cultivo ..... 17

2.2 Determinação dos teores de nitrogênio no material vegetal e índices de eficiência nutricional ..... 17

2.3 Delineamento experimental e análise estatística ..... 18

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 19

3.1 Produção de matéria seca e teores de nitrogênio ..... 19

3.2 Acúmulo de nitrogênio ..... 26

3.3 Eficiência de absorção ..... 27

3.4 Eficiência de translocação ..... 33

3.5 Eficiência de utilização ..... 37

3 CONCLUSÕES ..... 41

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 42

### CAPÍTULO 2

#### **TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA EM CAFEIEIRO SUBMETIDO A DÉFICIT HÍDRICO E DOSES DE NITROGÊNIO ..... 45**

RESUMO ..... 46

ABSTRACT ..... 47

1 INTRODUÇÃO ..... 48

2 MATERIAL E MÉTODOS ..... 50

2.1 Material vegetal e condições de cultivo ..... 50

2.2 Potencial hídrico foliar ..... 51

2.3 Determinação das Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* ..... 51

2.4 Delineamento experimental e análise estatística ..... 52

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
3.1 Déficit hídrico foliar .....	53
3.2 Trocas gasosas .....	55
3.3 Parâmetros da fluorescência da clorofila <i>a</i> .....	68
3.3.1 Razão Fv/Fm .....	68
3.3.2 Rendimentos quânticos.....	71
4 CONCLUSÕES .....	77
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

### **CAPÍTULO 3**

<b>PARÂMETROS CINÉTICOS DE ABSORÇÃO DE NITRATO NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DOS FRUTOS DO CAFEIRO EM CONDIÇÕES DE CAMPO .....</b>	<b>81</b>
RESUMO .....	82
ABSTRACT .....	84
1 INTRODUÇÃO.....	86
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	87
2.1 Condições experimentais.....	87
2.2 Ensaio de exaustão de nitrato .....	89
2.3 Cálculo dos parâmetros cinéticos .....	91
2.4 Estimação da produção de raízes finas e produção de frutos .....	91
2.5 Análise estatística .....	91
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.1 Parâmetros cinéticos de absorção de nitrato .....	92
3.2 Produção de raízes finas e produção de frutos .....	95
4 CONCLUSÕES .....	99
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

## **CAPÍTULO 1**

### **EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DO NITROGÊNIO EM CAFEIEIRO SUBMETIDO A DÉFICIT HÍDRICO**

## RESUMO

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Eficiência nutricional do nitrogênio em cafeeiro submetido a déficit hídrico.** Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Kacilda Naomi Kuki.

As mudanças nos padrões climáticos e a recente ocupação de novas áreas para desenvolvimento de atividades agrícolas em solos de baixa fertilidade têm motivado pesquisas para contribuir ao entendimento dos efeitos dos estresses abióticos, que incluem o hídrico e o nutricional, sobre a performance de aquisição e utilização de nutrientes por genótipos de cafeeiro possibilitando a identificação de materiais eficientes no uso desses recursos. Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência nutricional (absorção, translocação e utilização) de 4 genótipos de café arábica de 6 meses de idade (Mundo Novo – MN, Catuaí Amarelo – CA, Catuaí Vermelho – CV e Acauã – A) submetidos a déficit hídrico e doses contrastantes de nitrogênio. O experimento foi conduzido em casa de vegetação sob hidroponia. Foi utilizado um esquema fatorial (4x2x4) em delineamento de blocos casualizados com 3 repetições, sendo os fatores: 4 variedades, 2 doses de nitrogênio (alta – NA e baixa – NB) e 4 déficits hídricos (0, -0,4, -0,8 e -1,6 MPa) que foram estabelecidos via adição de PEG (Polietileno glicol). Foram considerados os compartimentos folhas, caule e ramos e, raízes. As plantas foram coletadas para estimar matéria seca e teores de nitrogênio total, a partir dos quais foram calculados os acúmulos nesses compartimentos visando obter os valores dos índices de eficiência nutricional. As regressões em função do aumento de déficit hídrico, mostraram que a eficiência de absorção no NA, aumentou para MN e CV, e para CA e A diminuiu. No NB as eficiências foram menores em relação a NA e aumentaram com os déficits para MN, CA e A, não variando para CV. Para eficiência de translocação na dose NA, MN, CA e A tiveram aumento contínuo até -0,8 MPa declinando em seguida até -1,6 MPa. Para Acauã o incremento foi contínuo até -1,6 MPa. No NB as eficiências foram menores em relação a NA até -0,4 MPa e, todas as cultivares mostraram aumento. Para eficiência de utilização no NA, MN, CA e CV mostraram diminuição. Para Acauã não variou. No NB todas as cultivares mostraram tendência de diminuição, exceto para MN que não variou. Pode-se concluir que MN foi a variedade que mostrou melhor desempenho quanto as eficiências de absorção, translocação e utilização tanto em adequada quanto em reduzida disponibilidade de nitrogênio, portanto, apresenta-se como adequada para diversos ambientes com e sem limitações hídricas e nutricional em relação a nitrogênio.

Palavras Chaves: Absorção. Eficiência nutricional. Déficit hídrico.

## ABSTRACT

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2019. **Nutritional efficiency of nitrogen in coffee tree submitted to water deficit.** Advisor: Hermínia Emília Prieto Martinez. Co-advisors: Paulo Roberto Cecon and Kacilda Naomi Kuki.

Changes in weather patterns and current employment of new areas for agricultural activities development on soils of low fertility have powered researches for contributing to comprehend effects of abiotic stresses in plants, including, the water and the nutritional stresses about the nutrient acquisition and utilization functioning by genotypes, allowing the identification of materials that are efficient in use of these resources. Thereby, the objective of this study was to evaluate the nutritional efficiency (absorption, translocation, and utilization) of six-month-old *Coffea arabica* (Mundo Novo – MN, Catuaí Amarelo – CA, Catuaí Vermelho – CV e Acauã – A) submitted to water deficits and contrasting nitrogen dose. Was used a factorial scheme in experimental design randomized block (4x2x4) with 3 replications, being the factors: 4 cultivars, 2 nitrogen dose (Low Nitrogen LN – High nitrogen HN) and 4 water deficit (0, -0,4, -0,8 e -1,6 MPa) that were established via the addition of PEG (Polyethylene glycol) to the nutritive solution. There were considered the compartments, leaves, stems, branches, and roots. The plants were collected to estimate dry matter and the total concentration of nitrogen, from which were calculated the contents of those compartments to obtain the values of the nutritional efficiency indexes. The regressions as a function of the absorption increase in the water deficit showed that the absorption efficiency in the NA dose increased on MN and CV and decreased on CA and A. On NB the efficiencies were lower regarding NA and increase with the deficits on MN, CA and A, do not vary on CV. On the translocation efficiency of the NA dose, MN, CA and A increased continually, until -0,8 MPa, declining at once until -1,6 MPa. On Acauã the increase was continuous until -1,6 MPa. On NB the efficiencies were lower regarding NA until -0,4 MPa and the cultivars showed an increase. On the utilization efficiency of the NA dose, MN, CA and CV showed decrease. On Acauã did not vary. On NB all the cultivars showed decreasing tendency, except on MN that did not vary. In conclusion, MN was the cultivar that showed better performance regarding the absorption, translocation and utilization efficiencies, in both adequate and reduced availability of nitrogen. Thus, it is presented such as adequate for various environments, with and without water and nutritive limitations in regard to nitrogen.

Keywords: Absorption. Nutritional efficiency. Water deficit.

## 1 INTRODUÇÃO

Extensas áreas dedicadas à cultura de café carecem de sistemas de irrigação, de forma que a disponibilidade hídrica nessas regiões está sujeita as variações climáticas que podem impactar negativamente o crescimento das plantas seja por elevadas temperaturas ou por escassas precipitações. Recentemente vem sendo considerados seus efeitos sobre as mudanças nos padrões de precipitações e sobre a ocorrência de eventos de seca, que nas últimas décadas vem se apresentando de forma cada vez mais acentuada e imprevisíveis, por causa da mudança climática associada ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Situação que tem mudado o clima global e elevado a temperatura da superfície terrestre em 0,74°C no século passado (IPCC, 2007). Regionalmente tem-se alterado os períodos de chuva afetando sua frequência e intensidade, impactando negativamente o balanço hídrico tanto por excesso quanto por déficit e, aumentado os eventos de seca que conduzem a déficit hídrico nas plantas devido ao aumento da taxa de evapotranspiração e redução na disponibilidade hídrica do solo.

O estudo dos efeitos dos estresses abióticos na produção de alimentos tem aumentado devido a seu impacto negativo sobre a produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, motivado em parte pelas mudanças dos padrões climáticos como consequência do aquecimento global. Além da expansão da cafeicultura em solos de baixa fertilidade devido à ocupação de áreas afetadas pela degradação, o que implica maior uso de adubos nitrogenados. A disponibilidade de nitrogênio e o déficit hídrico são considerados os fatores mais limitantes que impactam em maior grau a produção agrícola, por seus efeitos sobre processos relacionados com crescimento e metabolismo das plantas.

Os efeitos do déficit hídrico sobre plantas tem ampla revisão de literatura desde os aspectos fisiológicos, morfológicos, bioquímicos e moleculares (Harris et al, 2002; Taiz e Zeiger, 2006; Farooq et al, 2009; Ali, 2016) que afetam o crescimento e rendimento das culturas, as relações hídricas, as relações nutricionais, a fotossíntese, a partição de assimilados, a respiração e a ocorrência de danos oxidativos. Embora as respostas das plantas à seca sejam relativamente bem conhecidas, sua performance sob ambientes complexos onde ocorrem vários estresses simultaneamente é fragmentada. No nível nutricional o conhecimento dos padrões de absorção em ambientes restritivos pode fornecer informações sobre a forma como os genótipos adquirem os nutrientes do meio. Assim, quantificar as variações em termos do acúmulo de nutrientes e

produção de biomassa, contribui na identificação de genótipos eficientes nutricionalmente sob condições de déficit hídrico. Poucos trabalhos têm sido feitos para abordar o efeito concomitante do déficit hídrico e da adubação nitrogenada no cafeeiro, o que tem motivado recentemente a busca de informações sobre a atuação desses efeitos conjugados, como uma estratégia de seleção de genótipos com potencial de adaptação a condições adversas.

A adubação nitrogenada se reveste de grande importância devido a que o nitrogênio é o nutriente mais demandado pelo cafeeiro resultando na utilização de doses entre 200 a 450 kg/ha/ano (Ribeiro et al, 1999), além disso os custos dos adubos são elevados e a eficiência de recuperação dos adubos aplicados é baixa, próxima ao 50% (Baligar e Fageria, 1998), implicando que metade do adubo aplicado é perdido no ambiente por volatilização e lixiviação causando sérios impactos ambientais principalmente sobre corpos de água por causa da lixiviação do nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Jadoski et al, (2010) mencionam que a lixiviação de nitrato é um fenômeno físico, favorecido pela baixa adsorção às partículas do solo e a sua alta solubilidade em água. Portanto, é necessário adequar e melhorar o uso dos adubos em função da performance das cultivares para aumentar a sua eficiência agrônômica, assim como verificar os impactos do déficit hídrico sobre os processos de aquisição e utilização dos nutrientes pelas plantas, os quais podem ser avaliados através dos índices de eficiência nutricional. De forma geral eles relacionam aspectos da absorção, transporte e utilização de nutrientes com seu acúmulo e a produção de biomassa. A eficiência nutricional pode avaliar a resposta de adaptação das plantas ao solo, mostrando as diferenças no aproveitamento dos nutrientes em função de sua disponibilidade. Considerando que os índices são uma ferramenta que permitem discriminar genótipos em quanto a sua capacidade de aproveitamento dos nutrientes para crescimento, mostrando como responde um genótipo ao alterar a alocação de nutrientes e biomassa nos compartimentos da planta frente a uma determinada limitação nutricional ou hídrica. No caso da limitação hídrica as plantas tendem a diminuir o consumo e aumentar a absorção de água, mediante a diminuição da taxa de crescimento e produção de biomassa, alocando mais biomassa para as raízes e assim manter uma alta relação raízes/parte aérea (Yin et al., 2005; Martin e Stephen, 2006; Villagra e Cavagnaro, 2006) citados por (Wu et al, 2008), indicando que as plantas ajustam seu crescimento para facilitar a aquisição e distribuição de recursos limitantes.

O conceito de eficiência nutricional segundo Gerloff e Galbeman (1983), se refere à resposta dos genótipos a condições de déficit nutricional em função da eficiência em adquirir o

nutriente do substrato, translocá-lo para a parte aérea e utiliza-lo para produção de biomassa, de acordo com a quantidade de nutriente absorvido. O termo de eficiência se relaciona com a forma como os genótipos utilizam do substrato os nutrientes para incorpora-los e produzir biomassa através de processos fisiológicos e metabólicos, de maneira que com menores quantidades absorvidas determinado genótipo atinga máximo crescimento vegetativo e/ou reprodutivo. Marschner (2012) menciona que as diferenças genotípicas associadas à eficiência nutricional estão relacionadas com a absorção, transporte e utilização dos nutrientes pelas plantas, as quais são impactadas por fatores morfológicos, fisiológicos e pela demanda nutricional.

Na ausência de fatores limitantes, um adequado fornecimento de nitrogênio promove rápido desenvolvimento da planta, através do incremento no número de pares de folhas e ramos plagiotrópicos, número de nós por ramo, número de frutos por nó e flores por nó, o que está associado com maiores rendimento no café (Malavolta, 1986; Willson, 1985; Fahl et al., 1994, Nazareno et al., 2003) citados por (Carelli et al, 2006). Adicionalmente suprimento excessivo de N pode reduzir severamente o crescimento das raízes ou mesmo gerar toxicidade nas plantas (Zhao et al., 1998; Salih et al., 2005). Além disso, baixos níveis de nutrientes no solo estimulam o crescimento das raízes (Than e Hogan, 1997) e altos níveis de nutrientes no solo particionaram mais biomassa para a parte aérea (Li e Kang, 2002) citado por (Wu et al, 2008).

Quanto aos efeitos do déficit hídrico, ele pode afetar direta e indiretamente a absorção de nitrogênio, que conseqüentemente afeta o crescimento e produtividade da cultura; associado a reduções na taxa de assimilação líquida de carbono, devido a limitações estomáticas e não estomáticas que reduzem a concentração intercelular de CO<sub>2</sub>. Além disso, a escassez de água pode levar a deficiência de nutrientes, devido que a água proporciona o meio para a absorção da maioria dos nutrientes pelas raízes (DaMatta et al, 2002). Souza (2015) avaliou cultivares de café as quais foi imposto déficit hídrico de curto prazo via Polietileno glicol (PEG), encontrando que para Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Acauã aumentou significativamente o teor de nitrogênio nas raízes e, para Mundo Novo não houve diferenças significativas em relação ao tratamento sem déficit hídrico.

Outros trabalhos têm verificado diferenças entre genótipos de café nos padrões de absorção, acúmulo e utilização de nitrogênio e outros nutrientes (Amaral et al., 2002; Neves et al., 2005, Tomaz et al., 2009) conduzindo a diferenças na eficiência nutricional. Nas últimas décadas



iniciou-se o estudo do nitrogênio como fator que pode aliviar os efeitos negativos do déficit hídrico sobre a performance das plantas com destaque para os efeitos dos altos níveis de irradiância sobre a fotossíntese, e mais recentemente sobre as relações hídricas, ajustamento osmótico e atividade de enzimas antioxidantes. O estudo de DaMatta (2002) avaliando níveis de nitrogênio e regimes de irrigação, menciona que o nitrogênio aumento a rigidez da parede celular e o ajustamento osmótico, respostas associadas a melhoras na extração de água e redução da perda de volume celular, conduzindo a algum grau de tolerância a seca. O estudo indicou que sob alto nitrogênio *C. canephora* poderia lidar com a seca aumentando a capacidade de absorção de água em vez de minimizar a perda de água através do controle estomático (DaMatta et al, 2002). A função regulatória do nitrogênio na tolerância a déficit hídrico de plantas depende da intensidade do déficit e do nível de nitrogênio. Adequados níveis de nitrogênio suportam o crescimento regular das plantas e as ajudam a resistir o déficit (Zhong, et al 2017).

O estudo da eficiência nutricional sob limitações nutricionais e hídricas pode fornecer informações relevantes para selecionar genótipos em função dos padrões de resposta a utilização de recursos de grande importância na agricultura visando melhorar a economia do seu uso, especificamente dos adubos nitrogenados e da água. Portanto, se faz necessário conduzir estudos para verificar as respostas dos diversos genótipos atualmente usados na cafeicultura, em relação aos efeitos simultâneos desses fatores. Nesse sentido o conhecimento das cultivares mais utilizadas na cafeicultura em relação a sua eficiência nutricional tem relevante importância, na hora de selecionar cultivares que mostrem destacada performance no aproveitamento dos nutrientes e adequada resposta produtiva em condições limitantes. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar as respostas de acúmulo de nitrogênio e produção de biomassa de quatro cultivares de café arábica cultivadas em solução nutritiva, mediante a utilização de índices de eficiência nutricional em ambientes contrastantes de disponibilidade de nitrogênio e de déficit hídrico.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material vegetal e condições de cultivo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento da Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizadas nas coordenadas (20° 45' S, 42° 15' W e 650 metros de altitude), Minas Gerais. Foram utilizadas plantas jovens de cafeeiro (*C. arábica*) das cultivares Catuaí Amarelo, Catuaí vermelho, Acauã e Mundo Novo, provenientes de cultivo hidropônico com idade de 6 meses. O experimento foi conduzido do 28/03/17 até 18/08/17 totalizando 143 dias. As plantas foram cultivadas inicialmente nas doses de nitrogênio por um período de 67 dias e em seguida submetidas a déficit hídrico. Cada unidade experimental recebeu 6,5 litros de solução nutritiva com concentrações de 7 ou 2,8 mmol/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que definiram os níveis dos tratamentos de nitrogênio alto (NA) e baixo (NB). As concentrações dos demais nutrientes se mantiveram constantes e foram: 1 mmol/L P, 4,8 mmol/L K, 1mmol/L Mg, 1 mmol/L S, 2,1 mmol/L Ca, 40 µmol Fe-EDTA, 23 µmol/L B, 0,8 µmol/L Cu, 12 µmol/L Mn, 0,3 µmol/L Mo e 1 µmol/L Zn. Cada recipiente recebeu arejamento durante todo o período de condução do experimento, o pH foi mantido em torno de 6 ± 0,2. Foi feita reposição dos nutrientes devido a sua depleção via readição proporcional a redução de 30% da condutividade elétrica para os macronutrientes e micronutrientes exceto nitrogênio. Para nitrato foi adotado o critério de redução do 30% da concentração utilizando o sensor LAQUA Twin Nitrate NO<sub>3</sub> Meter®. A água transpirada foi adicionada diariamente para manter o volume da solução.

Por ocasião da imposição do déficit hídrico foram trocadas as soluções e calculadas as quantidades de PEG 6000 (Polietileno glicol) para gerar um déficit hídrico da solução de 0,0; - 0,4; -0,8; e -1,6 MPa de acordo com (Villela et al, 1991). As quantidades utilizadas por litro de solução para os déficits hídricos definidos foram 0 g, 172,6 g, 240,2 g e 335,8 g respectivamente. Essas quantidades foram fraccionadas em 6 doses e aplicadas diariamente de forma consecutiva para impor o déficit de forma gradativa. O déficit hídrico teve duração de 76 dias.

### 2.2 Determinação dos teores de nitrogênio no material vegetal e índices de eficiência nutricional

Finalizado o período de déficit, o material vegetal foi colhido e separado em três compartimentos folhas, caule (incluindo ramos) e raízes, todos lavados com água deionizada,

acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar, a 70°C, até peso constante. Foi obtida a massa de matéria seca (mMS) de cada compartimento e total da planta (mMST). A seguir, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley, de aço inoxidável, passadas em peneira de malha de 0,841mm, e acondicionadas em sacos de papel, para posterior determinação do teor de nitrogênio total. O material vegetal moído foi submetido a digestão sulfúrica pelo método de Kjeldahl (Malavolta et al., 1997). O conteúdo de nitrogênio foi obtido pelo produto entre o teor do nutriente (g/kg) e a matéria seca (kg) de cada compartimento da planta.

Os índices de eficiência nutricional foram calculados a partir das seguintes expressões que relacionam a produção de matéria seca e o conteúdo de nutrientes nos diferentes compartimentos assim como da planta toda:

- Eficiência de absorção (EA): Conteúdo total do nutriente / massa seca de raízes [g/g] (Swiader, 1994).
- Eficiência de translocação (ET): (Conteúdo do nutriente na parte aérea / conteúdo do nutriente total) x 100 [%] (Li, et al 1991).
- Eficiência de uso (EU): (massa seca total produzida)<sup>2</sup> / conteúdo total do nutriente [g<sup>2</sup>/g] (Siddiqui e Glass, 1981).

### **2.3 Delineamento experimental e análise estatística**

As unidades experimentais receberam as combinações de 3 fatores, duas doses de nitrogênio (alta e baixa), quatro déficit hídricos (0; -0,4; -0,8; e -1,6 MPa) e quatro variedades, que compuseram um esquema fatorial em delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e de regressão. Para o fator qualitativo as medias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey. Para o fator quantitativo foram ajustadas equações de regressão. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, no coeficiente de determinação e no comportamento do fenômeno. Independentemente da interação de maior grau ser ou não significativa optou-se pelo desdobramento da mesma devido ao interesse em estudo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Produção de matéria seca e teores de nitrogênio

As cultivares não mostraram diferenças significativas dentro das doses de nitrogênio e déficit hídricos na produção de matéria seca total (MST). No tratamento sem déficit hídrico ( $\Psi_w 0$ ) não houve diferenças entre doses de nitrogênio, mas as cultivares mostraram em média 8,6% menor MST na dose baixa de nitrogênio (NB) exceto para Catuaí Vermelho que mostrou um aumento de 29,8%, sugerindo que baixa disponibilidade de nitrogênio afetou a produção de biomassa devido a seu papel associado com a fotossíntese e, que o processo fotossintético em Catuaí Vermelho foi menos afetado pela dose NB. Sugiharto et al. (1990) encontraram uma correlação positiva significativa entre a capacidade fotossintética e o teor de nitrogênio foliar sugerindo que a maioria do nitrogênio é usado para síntese dos componentes do aparelho fotossintético, especialmente a Rubisco que tem uma importante função na assimilação de carbono. Fato que foi verificado pelas diferenças significativas nos teores foliares de nitrogênio das cultivares nas doses utilizadas, com menores teores no NB (Tabela 5). Em todos os graus de déficit hídrico não houve diferenças significativas entre cultivares dentro das doses de nitrogênio. Só Acauã mostrou diferença significativa no déficit  $-0,4$  MPa para o efeito das doses de nitrogênio, com maior produção de MST no NB (Tabela 1). Indicando que os efeitos das doses de nitrogênio não discriminaram as cultivares em relação a produção de MST nos diferentes graus de déficit hídrico.

As maiores produções de MST no NB seriam atribuídas à maior média da produção de matéria seca da raiz (MSR) (Tabela 3), e em menor proporção aos menores aumentos médios da produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das cultivares (Tabela 2). Presterl et al. (2003) mencionam que em ambientes com limitações de nitrogênio houve atraso do alongamento do caule e do crescimento de folhas, e aumento no crescimento das raízes. Portanto, NB levou a ajustamento diferenciado do crescimento das raízes e da parte aérea, não permitindo a ocorrência de diferença significativa de MST entre as doses de nitrogênio utilizadas. Além disso, vários autores mencionam que usualmente aumenta a alocação de biomassa para as raízes sob condições de déficit hídrico (Hamblin et al, 1991; Poorter e Nagel, 2000).

**Tabela 1.** Medias da matéria seca total (MST) de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
G								
CV	44,25 Aa	57,45 Aa	41,57 Aa	46,87 Aa	41,12 Aa	44,05 Aa	32,53 Aa	43,94 Aa
A	70,08 Aa	58,33 Aa	45,67 Ab	67,05 Aa	58,48 Aa	49,81 Aa	47,83 Aa	50,27 Aa
CA	67,51 Aa	56,58 Aa	49,55 Aa	55,76 Aa	38,62 Aa	43,38 Aa	40,60 Aa	50,77 Aa
MN	69,70 Aa	57,55 Aa	53,58 Aa	64,45 Aa	42,42 Aa	43,55 Aa	40,07 Aa	51,34 Aa
Media	62,89	57,48	47,59	58,53	45,16	45,20	40,26	49,08
CV (%)	25,33							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das cultivares não mostrou diferenças significativas dentro das doses de nitrogênio e de déficits hídricos (Tabela 2). Nos tratamentos sem déficit hídrico ( $\Psi_w 0$ ) não houve diferenças entre cultivares dentro das doses de nitrogênio. Nos tratamentos com déficit hídrico as cultivares não se diferenciaram dentro das doses de nitrogênio, mostrando que as cultivares tiveram uma resposta similar. A cultivar Acauã mostrou maior produção de MSPA no NB e  $\Psi_w -0,4$ , indicando que esse déficit hídrico afetou em menor proporção a assimilação de  $CO_2$  levando a maior produção de biomassa nessa cultivar.

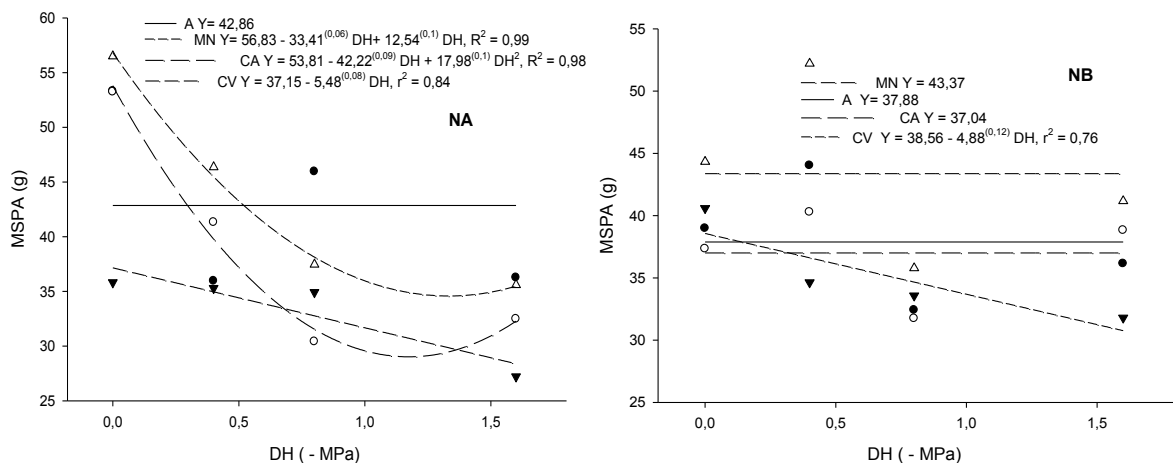
Em relação ao efeito das doses de nitrogênio dentro dos déficits hídricos e cultivares, apesar de não haver diferença significativa nos diferentes graus de déficit hídrico, mostrou-se maior produção média de MSPA no NB, exceto no déficit  $-0,8$  MPa. Indicando que as variações no crescimento da parte aérea das cultivares não foram afetadas pela disponibilidade de nitrogênio.

**Tabela 2.** Medias de matéria seca da parte aérea (MSPA) de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
G								
CV	35,81 Aa	40,59 Aa	35,29 Aa	34,62 Aa	34,92 Aa	33,57 Aa	27,22 Aa	31,79 Aa
A	53,30 Aa	38,97 Aa	35,94 Aa	44,01 Aa	45,95 Aa	32,41 Aa	36,25 Aa	36,14 Aa
CA	53,24 Aa	37,33 Aa	41,31 Aa	40,27 Aa	30,4 Aa	31,74 Aa	32,47 Aa	38,82 Aa
MN	56,49 Aa	44,32 Aa	46,36 Aa	52,2 Aa	37,46 Aa	35,78 Aa	35,59 Aa	41,16 Aa
Média	49,71	40,30	39,73	42,78	37,18	33,38	32,88	36,98
CV	26,2							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O déficit hídrico no NA afetou a média da produção de MSPA das cultivares mostrando reduções em relação ao tratamento sem déficit hídrico, correspondentes a 20,0 %, 25,2 % e 33,8 % nos déficits -0,4, -0,8 e -1,6 MPa respectivamente. As equações de regressão ajustadas mostraram que todas as cultivares tenderam a reduzir a produção de MSPA com aumento dos déficits hídricos exceto para Acauã que não mostrou ajuste, indicando que a MSPA desta cultivar não foi influenciada pelos déficits hídricos (Figura 1). Para NB houve aumento de 6,1 % da média da produção de MSPA no déficit hídrico -0,4 MPa, e reduções de 17,1 % e 8,2 % nos potenciais -0,8 e -1,6 MPa respectivamente, em relação ao tratamento sem déficit hídrico, mostrando de forma geral diminuições na produção da MSPA com aumentos da intensidade do déficit hídrico. As equações de regressão ajustadas mostram que a MSPA das cultivares foi pouco influenciada pelos déficits hídricos, exceto para Catuaí Vermelho que mostrou tendência de redução, indicando que a MSPA desta cultivar é em baixa disponibilidade de nitrogênio foi mais impactada pelos déficits hídricos.



**Figura 1.** Equações ajustadas da matéria seca da parte aérea (MSPA) das cultivares em função do déficit hídrico (DH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5% de significância.

As cultivares mostraram diferenças significativas da produção de matéria seca da raiz (MSR) dentro das doses de nitrogênio e déficit hídricos (Tabela 3). Nos tratamentos sem déficit hídrico houve diferenças entre cultivares no NA onde Acauã mostrou a maior produção de MSR, valores intermediários para Catuaí Amarelo e Mundo Novo e, com menores valores para Catuaí Vermelho. Nos tratamentos com déficit hídrico as cultivares se diferenciaram no NB e no déficit de -0,4 MPa com maior valor para Acauã, valor intermediário para Catuaí Amarelo e com os menores valores para Catuaí Vermelho e Mundo Novo. Da mesma forma no déficit -0,8 MPa, Acauã mostrou o maior valor, valores intermediários para Catuaí Amarelo e Catuaí

Vermelho e, o menor valor para Mundo Novo. Indicando que Acauã sob condições de déficit hídrico manteve essa característica, podendo representar uma vantagem na aquisição da água e nutrientes se sua capacidade de absorção não é reduzida nessas condições. Contrariamente Mundo Novo mostrou as menores produções o que poderia comprometer a aquisição desses recursos.

Em relação ao efeito das doses de nitrogênio sobre MSR dentro das cultivares e déficit hídricos, foram encontradas diferenças no tratamento sem déficit hídrico só para Catuaí Vermelho com maiores valores no NB. Nos tratamentos com déficit hídrico as diferenças foram verificadas no NB e no déficit hídrico de -0,4 MPa, onde Acauã e Catuaí Amarelo mostraram maiores valores. Também no NB e déficit de -1,6 MPa, Catuaí Vermelho mostrou maior produção de MSR. Tanto nos tratamentos sem déficit hídrico quanto com déficit, essas cultivares responderam com maior alocação de matéria seca para raiz no NB mostrando uma capacidade de ajustar o crescimento das raízes frente a limitações na disponibilidade de nitrogênio. Resposta que é normalmente verificada quando ocorre uma limitação de caráter nutricional como estratégia de aumentar a superfície de absorção para satisfazer a demanda da planta. Segundo Foshe, Classen e Jungk (1998), as raízes se tornam drenos preferenciais de fotoassimilados quando nutrientes especialmente nitrogênio limitam o crescimento, como adaptação para aumentar a eficiência de absorção em condições de limitação.

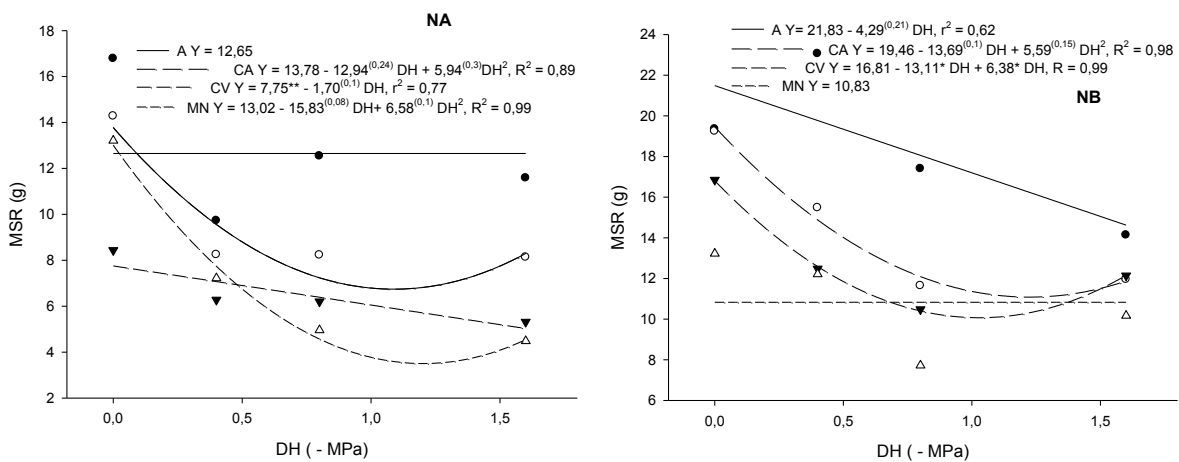
**Tabela 3.** Medias da produção de matéria seca de raiz (MSR) de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	$\Psi_w$ 0		$\Psi_w$ -0,4		$\Psi_w$ -0,8		$\Psi_w$ -1,6	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
G								
CV	8,43 Bb	16,85 Aa	6,28 Aa	12,48 Ba	6,20 Aa	10,48 ABa	5,31 Ab	12,14 Aa
A	16,78 Aa	19,35 Aa	9,72 Ab	23,06 Aa	12,53 Aa	17,4 Aa	11,58 Aa	14,13 Aa
CA	14,27 Ba	19,24 Aa	8,24 Ab	15,48 ABa	8,22 Aa	11,64 ABa	8,13 Aa	11,95 Aa
MN	13,20 Ba	13,22 Aa	7,19 Aa	12,21 Ba	4,95 Aa	7,72 Ba	4,48 Aa	10,17 Aa
Média	13,17	17,17	7,86	15,81	7,98	11,81	7,38	12,10
CV (%)	31,88							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O aumento do déficit hídrico no NA afetou a média da produção de raízes das cultivares em relação ao tratamento sem déficit mostrando reduções de 40,3 %, 39,4 % e 57,0 % nos déficit -0.4, -0.8 e -1.6 MPa respectivamente. As equações de regressão ajustadas mostraram

tendência de redução da MSR das cultivares com aumento dos déficits hídricos, exceto para Acauã. No NB as reduções foram de 7,9 %, 31,2 % e 29,5 % nos déficits -0.4, -0.8 e -1.6 MPa respectivamente em relação ao tratamento sem déficit, mostrando que as menores reduções se apresentaram na menor disponibilidade de nitrogênio, indicando que as variações de MSR são mais influenciadas pelo fator nutricional do que pelo déficit hídrico. Da mesma forma, a tendência de MSR no NB das cultivares foi diminuir conforme aumentaram os déficits hídricos, exceto para Mundo Novo indicando que MSR dessa cultivar não foi influenciada pelos déficits hídricos (Figura 2).



**Figura 2.** Equações ajustadas da matéria seca da raiz (MSR) das cultivares em função do déficit hídrico (DH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5% de significância.

Em relação a razão de produção de matéria seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) no tratamento sem déficit hídrico as cultivares não mostraram diferenças significativas entre doses de nitrogênio (Tabela 4), com menores valores no NB como consequência do aumento da produção da matéria seca de raízes. Nos tratamentos com déficit hídrico as cultivares conseguiram se diferenciar tanto no NA quanto no NB, exceto para o déficit de -1,6 MPa no NB mostrando menores MSPA/MSR, indicando que as respostas das cultivares só foram afetadas na condição mais limitante, levando a ausência de diferenças entre elas.



**Tabela 4.** Medias da relação produção de matéria seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/g							
CV	4,27 Aa	3,11 Aa	5,74 ABa	2,94 ABb	5,55 ABa	3,61 ABb	5,54 ABa	2,70 Ab
A	3,20 Aa	1,99 Aa	3,76 Ba	1,92 Bb	3,69 Ba	1,96 Ba	3,14 Ca	2,72 Aa
CA	3,74 Aa	2,03 Aa	5,11 ABa	2,59 ABb	4,21 Ba	2,75 ABa	4,12 BCa	3,47 Aa
MN	4,67 Aa	3,35 Aa	6,80 Aa	4,42 Ab	7,74 Aa	4,83 Ab	7,34 Aa	4,42 Ab
Média	3,97	2,62	5,35	2,97	5,30	3,29	5,04	3,33
CV (%)	56							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O efeito das doses de nitrogênio dentro de déficit hídrico e cultivares mostraram diferenças significativas no déficit hídrico de -0,4 MPa com menores valores no NB em todas as cultivares, assim como nos déficit hídricos de -0,8 e -1,6 MPa no NB, Catuaí Vermelho e Mundo Novo mostraram menores valores respectivamente indicando que baixa disponibilidade de nitrogênio nessas cultivares independentemente dos déficit hídricos promoveu o crescimento de raízes ou produção de novas raízes. Tanto no NA quanto no NB, Mundo Novo mostrou a maior MSPA/MSR dentre as cultivares em todos os déficits hídricos.

Os teores de nitrogênio nas folhas e nas raízes não mostraram diferenças entre cultivares no tratamento sem déficit hídrico, sendo significativamente menores no NB. Nos tratamentos com déficit hídrico os teores foliares das cultivares foram menores no NB com diferenças significativas em relação a NA. As diferenças entre cultivares foram encontradas só no déficit de -0,4 MPa no NB, com maior teor para Catuaí Amarelo (21,86 g/kg), teores intermediários para Catuaí Vermelho e Mundo Novo (21,69 e 20,8 g/kg) respectivamente e, menor teor para Acauã (17,95 g/kg) (Tabela 5).

**Tabela 5.** Medias dos teores de N foliar de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/kg							
CV	30,46 Aa	22,04 Ab	24,83 Aa	21,69 ABb	25,36 Aa	20,68 Ab	27,79 Aa	22,34 Ab
A	31,64 Aa	20,32 Ab	21,81 Aa	17,95 Bb	23,76 Aa	21,8 Aa	24,89 Aa	21,69 Ab
CA	31,17 Aa	20,56 Ab	22,69 Aa	21,86 Aa	24,81 Aa	21,23 Ab	24,65 Aa	21,69 Ab
MN	30,70 Aa	21,39 Ab	24,29 Aa	20,8 ABb	22,87 Aa	21,63 Aa	25,36 Aa	24,06 Aa
Média	30,99	21,08	23,41	20,58	24,20	21,34	25,67	22,45
CV (%)	8,43							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As doses de nitrogênio causaram diferenças dentro das cultivares e os déficit hídricos, no tratamento sem déficit hídrico, no NB as cultivares mostraram menores teores foliares em relação a NA. Nos tratamentos com déficit hídrico, houve diferenças entre NA e NB em função das cultivares. No NB e déficit de -1,6 MPa destaca-se a cultivar Mundo Novo, sem diferenças significativas em relação a NA, indicando que essa cultivar nas condições mais limitantes para aquisição do nitrogênio consegue absorber e transportar nitrogênio para as folhas.

Os teores de nitrogênio das raízes nos tratamentos com déficit hídrico diferiram entre doses de nitrogênio com menores valores no NB, no déficit de -0,8 MPa houve diferenças entre cultivares no NA com maior teor para Catuaí Vermelho (24,12 g/kg), teores intermediários para Acauã e Mundo Novo (21,67 e 22,28 g/kg) e menor teor para Catuaí Amarelo (19,20 g/kg). Da mesma forma no déficit de -1,6 MPa no NA houve diferenças entre cultivares com maior teor para Acauã (26,07 g/kg), teores intermediários para Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo (21,81 e 22,1 g/kg) e, menor teor para Mundo Novo (21,03 g/kg), esta última sem diferir com NB (Tabela 6). De forma geral a disponibilidade de nitrogênio impactou diretamente os teores de nitrogênio tanto nas folhas como nas raízes, independentemente dos aumentos de déficit hídrico.

**Tabela 6.** Medias dos teores de N nas raízes (g/kg) de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/kg							
CV	29,47 Aa	19,49 Ab	21,87 Aa	16,59 Ab	24,12 Aa	20,01 Ab	21,81 ABa	15,64 Ab
A	28,62 Aa	16,83 Ab	21,05 Aa	17,57 Ab	21,67 ABa	16,28 Ab	26,07 Aa	17,72 Ab
CA	28,56 Aa	17,95 Ab	20,09 Aa	14,99 Ab	19,20 Ba	15,46 Ab	22,10 ABa	17,30 Ab
MN	29,69 Aa	17,37 Ab	20,80 Aa	15,11 Ab	22,28 ABa	16,53 Ab	21,03 Ba	18,13 Aa
Média	29,09	17,91	20,95	16,07	21,82	17,07	22,75	17,20
CV (%)	13							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

### 3.2 Acúmulo de nitrogênio

O conteúdo total de nitrogênio das cultivares não apresentou diferenças significativas dentro das doses de nitrogênio e déficit hídricos, exceto no tratamento sem déficit hídrico ( $\Psi_w 0$ ) no NA, onde Catuaí Vermelho mostrou diferença em relação as outras cultivares com o menor acúmulo, mostrando que as cultivares responderam de forma similar a imposição dos tratamentos (Tabela 7).

**Tabela 7.** Medias do conteúdo total de nitrogênio de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

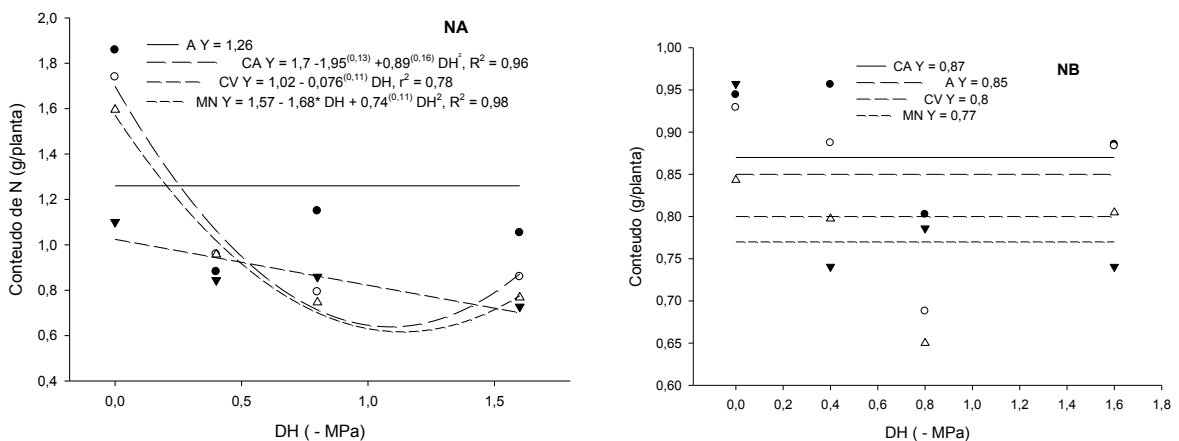
Cultivar	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/planta							
CV	1,100 Ba	0,957 Aa	0,844 Aa	0,741 Aa	0,859 Aa	0,786 Aa	0,727 Aa	0,741 Aa
A	1,858 Aa	0,944 Ab	0,881 Aa	0,956 Aa	1,149 Aa	0,802 Aa	1,053 Aa	0,881 Aa
CA	1,739 Aa	0,929 Ab	0,958 Aa	0,887 Aa	0,792 Aa	0,688 Aa	0,859 Aa	0,884 Aa
MN	1,596 Aa	0,843 Ab	0,957 Aa	0,797 Aa	0,746 Aa	0,650 Aa	0,768 Aa	0,805 Aa
Média	1,57	0,92	0,91	0,85	0,89	0,73	0,85	0,83
CV	23,2							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em relação ao efeito das doses de nitrogênio dentro das cultivares e déficit hídricos, foi constatado que as cultivares mostraram maiores conteúdos de nitrogênio no NA com diferenças significativas em relação a NB, exceto para Catuaí Vermelho que não teve diferenças no tratamento sem déficit hídrico ( $\Psi_w 0$ ). Nos tratamentos com déficits hídricos não houve

diferença entre doses de nitrogênio, indicando que déficit hídrico afetou o processo de acúmulo de nitrogênio devido as limitações que impõe no processo de absorção, apesar da maior disponibilidade de nitrogênio dos tratamentos com NA. As reduções da média do conteúdo no NB em relação a NA, correspondem a 7.1 %, 17.4 % e 2,8 % nos déficit de -0.4, -0.8 e 1.6 MPa respectivamente, pelo que a maior redução do acúmulo foi no déficit de -0.8 MPa, indicando que neste déficit ocorre a maior restrição para o acúmulo do nitrogênio.

Com o aumento do déficit hídrico houve reduções na média do conteúdo total das cultivares em relação ao tratamento sem déficit hídrico; no NA as reduções foram de 42,16 %, 43,65 % e 45,86% e no NB as reduções foram de 7,95 %, 20,34 % e 9,86 % nos deficit-0.4, -0.8 e 1.6 MPa respectivamente. Mostrando de forma geral diminuições na média de conteúdo total de nitrogênio das cultivares com aumentos da intensidade do déficit hídrico, com maiores reduções para NA. As equações ajustadas no NA mostraram uma tendência de redução do conteúdo de nitrogênio das cultivares conforme aumentaram os déficits hídricos exceto para Acauã. No NB todas as cultivares não mostraram uma tendência definida da resposta ao aumento dos déficits, o que poderia ser explicado pelas menores reduções, mostrando que Catuaí Amarelo e Acauã foram superiores a Catuaí Vermelho e Mundo novo



**Figura 3.** Equações ajustadas do conteúdo total de nitrogênio das cultivares em função do déficit hídrico (DH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5% de significância.

### 3.3 Eficiência de absorção

As cultivares mostraram diferenças dentro das doses de nitrogênio e dos déficits hídricos, verificadas no NA nos déficits hídricos -0,8 e -1,6 MPa (Tabela 8). Portanto, sob maior disponibilidade de nitrogênio houve diferenças entre cultivares em resposta ao déficit hídrico.

Uma adequada nutrição nitrogenada tem aliviado os danos causados pela seca mediante a sustentação das atividades metabólicas sob reduzido déficit hídrico dos tecidos (Zhang et al., 2007). A cultivar Mundo Novo mostrou maiores eficiências nesses potenciais, seguida pela Catuaí Vermelho, Catuaí Amarelo e com menor eficiência a variedade Acauã. Portanto, Mundo Novo teria uma melhor performance na absorção de nitrogênio por unidade de matéria seca de raiz (MSR) em condições de déficit hídrico.

A maior eficiência de Mundo Novo poderia ser explicada em maior grau pela menor produção da MSR dentre as variedades, além da ausência de diferenças significativas entre elas (Tabela 3), do que pelo conteúdo total de nitrogênio que não apresentou diferenças significativas entre cultivares (Tabela 7), implicando que com menor quantidade de raízes teve conteúdo de nitrogênio similar às outras variedades, portanto, a absorção de nitrogênio foi a menos comprometida pelo efeito do déficit hídrico. Resultados similares foram encontrados ao submeter a variedade Catuaí Vermelho a diferentes graus de déficit hídrico, encontrando reduções significativas da MSR em todos os tratamentos em relação ao controle sem déficit hídrico (Fialho et al, 2010).

A relação da produção de matéria seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) fornece informação sobre o investimento relativo de fotoassimilados para crescimento destes compartimentos. Uma maior relação reflete menor investimento para produção de MSR, assim Mundo Novo mostrou os maiores valores nos déficit -0,8 e -1,6 MPa. Segundo Föhse et al (1988) plantas eficientes na absorção de P apresentam alta taxa de absorção do nutriente por unidade de massa de raiz (alto influxo) e, também alta relação parte aérea/raiz, sendo a segunda condição verificada neste trabalho.

**Tabela 8.** Medias de eficiência de absorção de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	$\Psi_w$ 0		$\Psi_w$ -0,4		$\Psi_w$ -0,8		$\Psi_w$ -1,6	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/g							
CV	0,133 Aa	0,069 Ab	0,136 Aa	0,062 Ab	0,136 ABa	0,084 Ab	0,147 ABa	0,064 Ab
A	0,112 Aa	0,048 Ab	0,092 Aa	0,041 Ab	0,092 Ba	0,049 Ab	0,090 Ca	0,067 Aa
CA	0,122 Aa	0,049 Ab	0,119 Aa	0,057 Ab	0,109 ABa	0,059 Ab	0,108 BCa	0,079 Aa
MN	0,132 Aa	0,064 Ab	0,140 Aa	0,067 Ab	0,155 Aa	0,087 Ab	0,162 Aa	0,093 Ab
Média	0,125	0,058	0,122	0,057	0,123	0,070	0,127	0,076
CV (%)	26,2							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Acauã mostrou a menor eficiência, o que seria explicado pela maior produção da MSR nos déficits hídricos -0,8 e -1,6 MPa e no NA sem diferenças significativas entre variedades, indicando que apesar de possuir maior quantidade de tecido de aquisição ele não representou maior absorção de nitrogênio o que foi verificado pela ausência de significância entre cultivares no conteúdo total nesses déficits, de modo que o conteúdo de nitrogênio foi menos que proporcional à maior produção da MSR. Sob condições de déficit hídrico leve, a alocação relativa de biomassa às raízes geralmente aumenta (Hamblin et al, 1991), o que representa uma vantagem ao aumentar a capacidade de absorção, mas no caso desta variedade não levou a aumentos expressivos no conteúdo total de nitrogênio. A relação da produção de MSPA/MSR nesses déficits foram as menores com diferenças significativas entre cultivares o que confirma sua menor eficiência de absorção devido ao similar conteúdo de nitrogênio com as outras cultivares.

As cultivares não mostraram diferenças significativas da eficiência de absorção no NB tanto sem déficit quanto com déficit hídrico, devido a que maiores produções de MSR não conduziram a maior acúmulo total de nitrogênio. Resposta que é verificada ao diminuir a absorção de nutrientes em baixa disponibilidade, além da limitação na absorção de água e nutrientes imposta pelo déficit hídrico. Mundo Novo mostrou a maior eficiência decorrente da menor produção de MSR e similar conteúdo de nitrogênio em relação as outras cultivares, apesar da ausência de diferenças significativas entre elas.

Os parâmetros cinéticos de absorção são componentes fisiológicos que permitem compreender a eficiência nutricional, na capacidade dos genótipos de absorção de nutrientes em diversas condições. Desta forma, a absorção de nutrientes incluído nitrogênio, pode ser avaliada através dos parâmetros cinéticos de absorção, definidos como  $V_{max}$  (velocidade máxima de absorção do nutriente por unidade de raiz),  $K_m$  (constante de Michaelis-Menten, que representa a concentração externa de nutriente necessária para que a absorção seja metade da  $V_{max}$ ) e  $C_{min}$  (concentração externa na qual o fluxo líquido de íons é zero) segundo Rocha et al, (2014), parâmetros que representam as características da absorção de nutrientes de um genótipo em função da concentração do meio externo.

No trabalho de Sousa (2015) em casa de vegetação foi imposto déficit hídrico de -1,5 MPa por um período de 48 horas visando estimar os parâmetros cinéticos de absorção de nitrato em oito cultivares de café incluídas as avaliadas neste trabalho. Sob déficit hídrico foram

encontrados menores valores nos três parâmetros para a maioria das cultivares com diferenças significativas em relação ao tratamento sem déficit hídrico, exceto para Mundo Novo que não mostrou diferenças significativas nos três parâmetros, e os menores valores dentre as cultivares. Portanto, Mundo Novo é uma cultivar, que mantém absorção de nitrogênio a baixas taxas (menor  $V_{max}$ ) sem ser impactado negativamente por efeito do déficit hídrico, pelo que poderia ser considerado um genótipo estável na absorção de nitrogênio independentemente da restrição hídrica. Essa resposta de curto prazo corrobora a maior eficiência nos déficits de -0,8 e -1,6 MPa mostrada neste trabalho, indicando provavelmente que a duração do déficit pode induzir ativação de mecanismos de ajuste fisiológicos que permitem manter a absorção de nitrogênio sob déficit hídrico. Por outra parte, os baixos valores de  $K_m$  e  $C_{min}$  de Mundo Novo favoreceriam a absorção de nitrogênio em condições de baixa disponibilidade, devido ao aumento da afinidade do carregador com o nitrato e, por outra parte ao conseguir absorver nitrogênio em baixas concentrações, pelo que a resposta no NB pode estar relacionada com a manutenção de baixos valores desses parâmetros ao longo do período de imposição do déficit hídrico (76 dias). Ernani et al. (1994) mencionam que sob restrição na disponibilidade de nutrientes  $V_{max}$  deixa de ser o parâmetro cinético que mais influencia a absorção de nutrientes e  $K_m$  passa a ser o parâmetro mais relevante.

Santos e Carlesso (1998) mencionam que os mecanismos morfofisiológicos respondem dependendo da velocidade de aparição ou imposição do déficit hídrico, sendo afetados severamente quando a ocorrência é rápida mostrando conseqüentemente uma resposta rápida para se adaptar à nova condição e que em plantas submetidas a déficit hídrico gradual ocorre mais facilmente adaptação das plantas. De modo que durante o período de imposição do déficit Mundo Novo provavelmente utilizou algum mecanismo de ajuste fisiológico que permitiu alcançar a maior eficiência de absorção. O mecanismo de ajustamento osmótico tem sido evidenciado para café como possível responsável para contornar o déficit hídrico em termos de manter ou melhorar a absorção de água e conseqüentemente nutrientes. No trabalho de Tounekti et al, (2018) avaliando o efeito de seca em 4 cultivares de café encontraram considerável capacidade de ajuste osmótico por todas as cultivares, DaMatta (2004) menciona que a participação deste mecanismo em resposta a condições de déficit hídrico considera-se de baixas magnitudes e, portanto, pouco efetivo para café.

Sousa (2015) encontrou que as cultivares submetidas a déficit hídrico reduziram significativamente o parâmetro  $V_{max}$  em relação ao tratamento sem déficit hídrico, exceto para

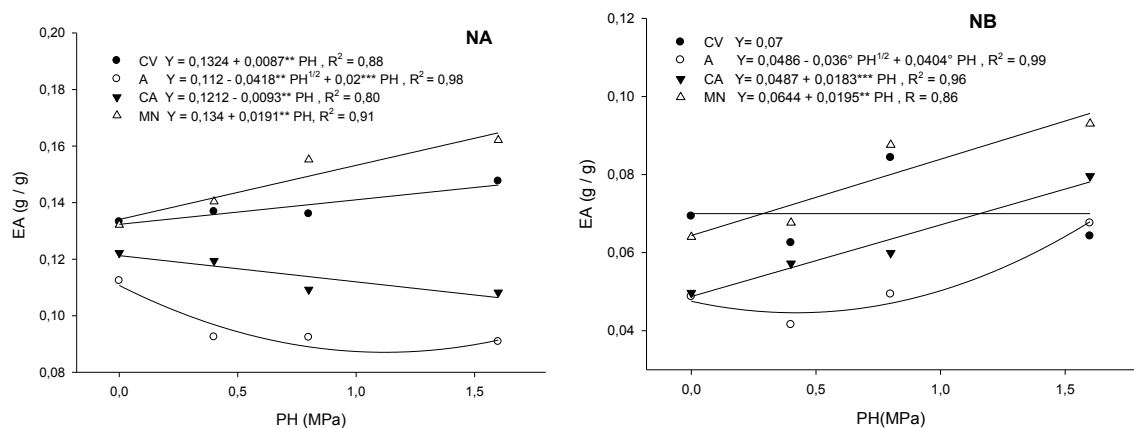
Mundo Novo que não mostrou diferença significativa. Sob déficit hídrico Catuaí Amarelo mostrou a maior  $V_{max}$ , Acauã um valor intermediário e Catuaí Vermelho e Mundo Novo as menores  $V_{max}$ , indicando que existem diferenças genotípicas na capacidade de absorção de nitrogênio em resposta a imposição de déficit hídrico de curto prazo. Neste trabalho Acauã nos déficits  $-0,8$  e  $-1,6$  MPa, provavelmente poderia ter afetado seu valor de  $V_{max}$  por efeito da duração do déficit hídrico. Além disso, é importante considerar que diferenças genotípicas na eficiência nutricional estão relacionadas a outros fatores como a demanda de nutrientes a nível celular, compartimentalização, utilização na parte aérea (retranslocação), transporte a curta e a longa distâncias, afinidade do sistema de absorção ( $K_m$ ), concentração mínima ( $C_{min}$ ) e modificações na rizosfera (Marschner, 2012).

No NA se observam duas tendências, nas cultivares Mundo Novo e Catuaí Vermelho se apresentou aumento da eficiência de absorção na medida que aumentou o déficit hídrico definida por uma equação linear; com maior declividade para Mundo Novo; de modo que essas cultivares provavelmente mostraram uma resposta ativa frente à limitação hídrica (Figura 4). Resposta que pode corresponder a mecanismos de ajustamento osmótico baseado na síntese de compostos nitrogenados, que permitem manutenção da capacidade de absorção do nitrogênio. Rocha (2019) avaliando as mesmas cultivares encontrou na dose alta de nitrogênio aumento da concentração de prolina nas raízes, e aumento linear no teor com o aumento do déficit hídrico, indicando que prolina contribuiu no ajustamento osmótico nessas variedades. Ajuste osmótico tem um efeito positivo sobre a turgidez das células e, portanto, sobre crescimento das raízes, melhorando a capacidade de absorção da água (Chimenti et al, 2006; Blum, 2009), mas a MSR destas cultivares mostrou diminuições com o aumento dos déficits hídricos, sugerindo que além do aumento da concentração de prolina nas raízes outros fatores fisiológicos influenciaram sua maior eficiência de absorção, possivelmente associado a maiores taxas de absorção do nitrato.

Em condições de déficit hídrico os teores de nitrogênio na raiz se reduziram em relação ao tratamento sem déficit hídrico, mas com o aumento dos déficits hídricos os teores nas raízes não sofreram diminuição. Os teores de nitrogênio das raízes nos déficits hídricos  $-0,4$ ,  $-0,8$ ,  $-1,6$  MPa para Mundo Novo foram: 20.80, 22.28 e 21.03 g/kg respectivamente, mostrando reduzida variação com a imposição e manutenção do déficit hídrico crescente. Para Catuaí Vermelho os teores foram: 21.87, 24.12 e 21.81 g/kg, mostrando pouca variação nos teores radiculares indicando que ajuste osmótico não contribuiu no aumento da absorção de nitrogênio destas cultivares.



A tendência para as cultivares Catuaí Amarelo e Acauã mostrou um padrão contrário diminuindo na medida que aumenta o déficit hídrico, de modo que são cultivares que são impactadas negativamente pela imposição do déficit hídrico, devido a que em todos os déficits hídricos mostraram a maior produção de MSR sem aumentos significativos no conteúdo total. De fato, Acauã mostrou as seguintes MSR: 9,72 g, 12,53 g e 11,58 g nos déficits -0,4, -0,8 e -1,6 MPa respectivamente, resposta que estaria mais direcionada com a aquisição da água devido a que nitrogênio não seria um fator limitante.



**Figura 4.** Equações ajustadas da eficiência de absorção das cultivares em função do déficit hídrico (PH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5%, \*\*\* 10%, ° > 10% de significância.

Para o NB as cultivares Mundo Novo e Catuaí Amarelo mostraram uma tendência de aumento da eficiência com resposta linear e, para Acauã de tipo raiz quadrada (Figura 4), indicando que déficit hídrico nestas cultivares promoveu uma resposta para manter absorção do nitrogênio, de menor magnitude e com diferenças significativas em relação a NA, portanto, a disponibilidade de nitrogênio influenciou a respostas das cultivares. As linhas de tendência no gráfico mostram que Mundo Novo é a cultivar mais eficiente, seguida pela Catuaí Amarelo e Acauã, correspondendo com uma relação inversa entre as magnitudes da MSR e os valores da eficiência de absorção. Catuaí Vermelho não apresentou ajuste da eficiência de absorção aos aumentos dos déficits hídricos, pelo que sua eficiência foi estimada pela média, indicando que sua eficiência não variou com o aumento dos déficits hídricos.

Houve efeito significativo das doses de nitrogênio dentro dos déficits hídricos e cultivares, de modo que as cultivares sob maior disponibilidade de nitrogênio foram mais eficientes em todos os déficits hídricos (Tabela 8), indicando que nitrogênio melhora a capacidade de resposta das cultivares frente aos efeitos negativos do déficit hídrico. No trabalho

de Machado (2015) avaliando a eficiência nutricional de 13 clones de café em função do aumento da dose recomendada, encontrou aumento na eficiência de absorção para a maioria de clones, mostrando que sob maior disponibilidade de nitrogênio a planta absorve concomitantemente maiores quantidades se não existe alguma restrição por outros fatores.

No trabalho de DaMatta (2002) avaliando o efeito de níveis de nitrogênio (alto e baixo) e dois níveis de irrigação (alto e baixo) verificou-se que no tratamento de baixa irrigação, nem o déficit hídrico ao amanhecer ( $\Psi_{pd}$ ) nem o déficit hídrico ao meio-dia ( $\Psi_m$ ) foram significativamente alterados pelos níveis de nitrogênio, mas em alto nitrogênio as plantas tiveram maior conteúdo relativo de água do que no baixo nitrogênio, portanto, as relações hídricas internas foram em certa medida relacionadas com o fornecimento de nitrogênio. Adicionalmente o potencial osmótico também foi mesurado mostrando um valor mais negativo no tratamento de baixa irrigação e alto nitrogênio, indicando que maior fornecimento de nitrogênio pode promover ajuste osmótico, o que contribuiria ao aumento da capacidade de absorção de água e conseqüentemente de nitrogênio.

### **3.4 Eficiência de translocação**

Nos tratamentos com déficit hídrico houve diferenças significativas entre cultivares dentro das doses de nitrogênio, no NB e déficit hídrico -0,4 MPa Mundo Novo, Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo formaram um grupo de maior eficiência de translocação tendo Mundo Novo a maior eficiência, com diferenças em relação a Acauã com menor eficiência. No déficit -0,8 MPa as cultivares também diferiram, onde Mundo Novo mostrou a maior eficiência seguida por Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo sem diferenças entre elas é a menor eficiência para Acauã. No NA e déficit -1,6 MPa as cultivares também mostraram diferenças, onde Mundo Novo e Catuaí Vermelho tiveram as maiores eficiências sem diferenças entre elas, seguido de Catuaí Amarelo e com a menor eficiência para Acauã (Tabela 9). Adicionalmente Mundo Novo nos déficits -0,4 e -0,8 MPa também mostrou maior eficiência sem diferenças significativas entre cultivares.

**Tabela 9.** Medias da eficiência de translocação de nitrogênio de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro níveis de déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

VAR	$\Psi_w 0$		$\Psi_w -0,4$		$\Psi_w -0,8$		$\Psi_w -1,6$	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	g/g (%)							
MN	76,30 Aa	72,84 Aa	84,75 Aa	77,20 Aa	84,81 Aa	80,34 Aa	85,40 Aa	79,94 Aa
CV	77,69 Aa	69,46 Ab	82,88 Aa	73,25 Ab	81,68 Aa	75,43 ABa	84,02 Aa	75,59 Ab
CA	76,48 Aa	62,87 Ab	82,24 Aa	73,35 Ab	78,52 Aa	74,03 ABa	79,33 ABa	77,47 Aa
A	74,54 Aa	65,38 Ab	76,98 Aa	62,32 Bb	76,51 Aa	66,32 Bb	71,31 Ba	73,02 Aa
Média	76,25	67,64	81,71	71,53	80,38	74,03	80,02	76,51

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em todos os casos as maiores eficiências de translocação se relacionaram com maiores teores foliares de nitrogênio comparado com os teores na raiz. De forma geral foi evidenciado que as diferenças entre cultivares se manifestaram em todos os déficits hídricos e maiormente no NB com menores eficiências médias em relação a NA, indicando que menor disponibilidade de nitrogênio promoveu a resposta das cultivares afetando sua alocação para a parte aérea das cultivares, verificado pelos menores teores foliares. Além disso, no NB a produção de MSR foi maior em todos os déficits hídricos levando ao aumento no conteúdo de nitrogênio na raiz sem afetar a eficiência de translocação do nitrogênio para a parte aérea.

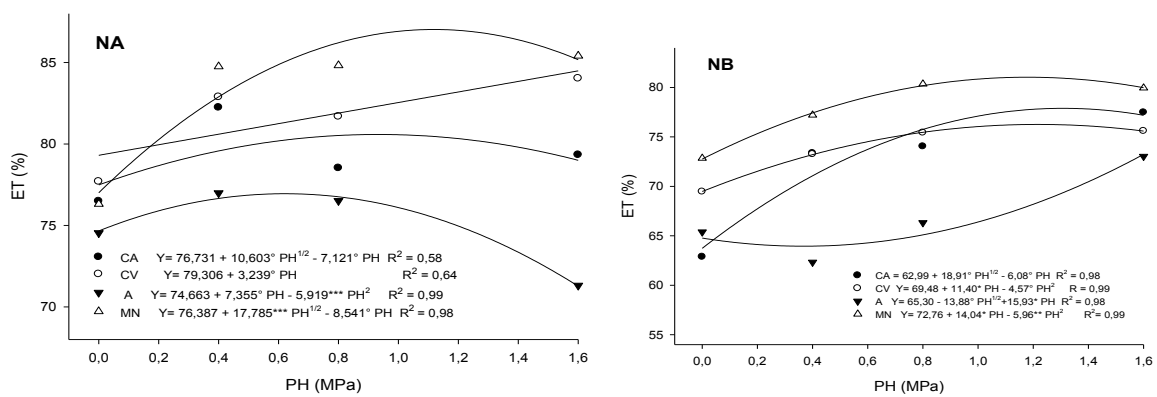
A eficiência de translocação se refere a quantidade do nutriente acumulado na parte aérea em relação a quantidade acumulada na planta, indicando a proporção do acúmulo na parte aérea; o qual está influenciado pela magnitude do transporte do nutriente pelo processo transpiratório. De forma que transpiração poderia explicar em parte as diferenças encontradas entre variedades, Sousa (2015) avaliando as mesmas cultivares utilizadas neste trabalho encontrou menores transpirações quando submetidas a déficit hídrico de -1,5 MPa sem diferenças significativas entre elas. No trabalho de DaMatta et al (2002) avaliando trocas gasosas, encontrou-se que a disponibilidade de nitrogênio (alta e baixa) não afetou a transpiração no tratamento de alta disponibilidade de água. Na menor disponibilidade de água houve menor transpiração nos dois tratamentos de nitrogênio, indicando que independentemente da disponibilidade de nitrogênio a resposta da transpiração mudou em função da disponibilidade da água. Portanto, as diferenças varietais na eficiência de translocação neste trabalho poderiam estar associadas à resposta diferencial da transpiração como efeito da maior duração do déficit hídrico, alterando a quantidade de nitrogênio alocado na parte aérea. Abichequer e Bohnen (1998) mencionam que a eficiência de translocação é

influenciada pelo estado nutricional das células da raiz e pela taxa de transpiração dos genótipos. As diferenças encontradas entre cultivares também poderiam estar relacionadas a demanda de nitrogênio para funcionamento da maquinaria metabólica, principalmente no processo fotossintético de maneira que sua eficiência em termos da atividade das enzimas envolvidas poderia precisar de menores ou maiores teores para alcançar um determinado rendimento, sendo um fator que contribuiria com a alocação de nutrientes principalmente nas folhas.

Em relação ao efeito das doses de nitrogênio dentro de cultivares e déficit hídrico, as eficiências foram significativamente maiores no NA para todas as cultivares no déficit -0,4 MPa, exceto no Mundo Novo que não diferiu em relação a NB. No NB Catuaí Vermelho teve menor eficiência no déficit -1,6 MPa, as outras cultivares não mostraram diferenças significativas em relação a NA. Da mesma forma no NB só Acauã teve menor eficiência no déficit -0,8 MPa, as outras cultivares não mostraram diferenças significativas com NA. Assim, o efeito das doses de nitrogênio sobre as cultivares se verificou maiormente no déficit -0,4 MPa, indicando que nesse déficit houve uma limitação sobre o acúmulo de nitrogênio na parte aérea das cultivares pelo tratamento NB. Nos déficits -0,8 e -1,6 MPa diferenças entre doses de nitrogênio se verificaram só em Acauã e Catuaí Vermelho respectivamente com menores valores no NB, mostrando que nessas variedades o transporte de nitrogênio para a parte aérea foi mais limitado. De forma geral pode-se inferir que a resposta da eficiência de translocação das cultivares foi impactada pela disponibilidade de nitrogênio nos tratamentos sem déficit e com déficit -0,4 MPa, exceto para as cultivares mencionadas. Destaca Mundo Novo devido a ausência de significância entre doses de nitrogênio em todos os déficits, indicando que os diferentes ambientes gerados pelos tratamentos não afetaram sua eficiência de translocação, sendo que esta variedade parece ter adaptabilidade a ambientes com e sem limitações de nitrogênio e disponibilidade hídrica para alocar nitrogênio na parte aérea.

Para o efeito do déficit hídrico dentro de nitrogênio e cultivares foram ajustadas equações de regressão visando verificar o padrão de resposta das cultivares dentro de cada dose de nitrogênio (Figura 5). Para NA as cultivares Mundo Novo e Catuaí Amarelo mostraram ajuste a equação de raiz quadrada, para Acauã a uma equação quadrática. Foram calculados os pontos de máxima eficiência em função dos déficits mostrando que Catuaí Amarelo atingiu -0,86 MPa, Mundo novo -1,02 MPa e Acauã -0,62 MPa. Valores de déficit hídrico acima deles causaram redução nas eficiências nessas variedades. Catuaí Vermelho mostrou tendência de aumento na medida que aumentou o déficit hídrico se ajustando a uma equação linear. Portanto,

Catuaí Vermelho é uma variedade que mostrou reduzido impacto do déficit hídrico sobre o acúmulo de nitrogênio na parte aérea, apesar de sua baixa eficiência de absorção. As outras cultivares mostraram que a eficiência máxima de translocação foi atingida com déficits hídricos diferenciais, indicando que os mecanismos de translocação das cultivares foram afetados diferencialmente. Garg e Mc. Williams (2003) mencionam que um importante efeito do déficit hídrico se relaciona com aquisição de nutrientes e seu transporte para a parte aérea. De modo que baixa disponibilidade de água reduz a absorção de nutrientes devido à interferência nos mecanismos de descarga no xilema e ao reduções no fluxo transpiratório.



**Figura 5.** Equações ajustadas da eficiência de translocação das cultivares em função do déficit hídrico (PH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5%, \*\*\* 10%, ° > 10% de significância.

Para NB todas as cultivares mostraram tendência de aumento da eficiência de translocação na medida que aumentou o déficit hídrico com ajuste a equações de raiz quadrada para Catuaí Amarelo e Acauã e quadrática para Catuaí Vermelho e Mundo Novo, com menores eficiências em relação a NA. Com aumentos médios de 5,7 %, 9,4 % e 13,1 % nos déficits -0.4, -0.8 e -1.6 MPa respectivamente com relação ao controle sem déficit hídrico, devido ao aumento médio da proporção de matéria seca alocada na parte aérea das cultivares acompanhado de aumentos nos teores foliares. Foram calculados os pontos de máxima eficiência em função dos déficits mostrando valores de -1,24; -1,25 e -1,18 MPa para Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo respectivamente. As menores eficiências nesta dose foram reduzidas pela menor disponibilidade de nitrogênio, e por outra parte o déficit hídrico imposto teve um reduzido efeito sobre esta eficiência, de modo que poderia se considerar que as cultivares aumentaram o transporte de nitrogênio para a parte aérea visando manutenção da atividade metabólica. A eficiência de translocação em condições de déficit hídrico foi maior

em todos os déficits hídricos em relação ao tratamento sem déficit, o que implica que sob limitação hídrica as cultivares melhoraram o transporte de nitrogênio para a parte aérea.

### **3.5 Eficiência de utilização**

Nos tratamentos com déficit hídrico houve diferenças significativas entre cultivares, que foram verificadas só no NB dentro do déficit -0,4 MPa evidenciando que as diferenças entre cultivares se manifestaram no menor grau de déficit hídrico. A cultivar Mundo Novo mostrou a maior eficiência seguida por Acauã, Catuaí Amarelo e com a menor eficiência Catuaí Vermelho (Tabela 9). De modo que Mundo Novo é a cultivar que melhor performance mostrou no uso do nitrogênio acumulado para produção de biomassa, contribuindo para isso a maior eficiência de absorção e translocação. Adicionalmente as cultivares em todos os déficit hídricos tiveram maiores eficiências no NB, indicando que o padrão de resposta em condições limitantes de nutrientes é maximizar o uso do nutriente menos disponível para manter suas atividades metabólicas, especificamente as referidas a produção de biomassa o que poderia ser alcançado dependendo da quantidade e atividade dos componentes da rota de assimilação de carbono.

Vários autores mencionam os efeitos negativos do déficit hídrico sobre o aparato fotossintético indicando a ocorrência de mudanças nos pigmentos e componentes fotossintéticos, danos ao aparato fotossintético e diminuição da atividade das enzimas do ciclo de Calvin, as quais são importantes causas da redução no rendimento das culturas (Anjum et al., 2003; Fu e Huang, 2001; Monakhova e Chernyadev, 2002) citado por (Farooq et al, 2009). As diferenças entre cultivares ocorridas no menor déficit hídrico, foram ocasionadas pelo menor impacto desse déficit sobre as funções fotossintéticas e conseqüentemente sobre a produção de biomassa, sendo verificado pelo reduzido aumento médio da MST das cultivares (1,84 %) em relação ao tratamento sem déficit hídrico. Neste sentido o aumento da intensidade do déficit hídrico representado pelos déficits -0,8 e -1,6 MPa limitaram a resposta da eficiência das cultivares ao não se apresentar diferenças significativas. A maior eficiência de Mundo Novo estaria relacionada com processos de ciclagem interna (redistribuição) implicando a utilização de nitrogênio alocado em outros tecidos, ou melhor utilização do nitrogênio pela maquinaria fotossintética para produção de biomassa. Nesse sentido Gerloff e Gabelman (1983), mencionam que maior eficiência de utilização pode ser devida à menor necessidade de nutrientes para funcionamento da maquinaria bioquímica da planta, à maior redistribuição do

nutriente para os pontos de crescimento e à maior mobilização do nutriente armazenado nos vacúolos das células em situação de deficiência.

**Tabela 9.** Medias da eficiência de utilização de nitrogênio de quatro cultivares de café conduzidas em duas doses de nitrogênio e quatro déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0		$\Psi_w$ -0,4		$\Psi_w$ -0,8		$\Psi_w$ -1,6	
	NA	NB	NA	NB	NA	NB	NA	NB
	$g^2/g$							
MN	3052,5 Aa	3929,4 Aa	3007,0 Ab	5218,2 Aa	2443,5 Aa	2923,1 Aa	2102,6 Aa	3344,6 Aa
A	2648,1 Aa	3621,4 Aa	2372,5 Ab	4717,6 ABa	2982,0 Aa	3120,8 Aa	2182,0 Aa	2877,7 Aa
CA	2624,4 Aa	3455,2 Aa	2574,9 Aa	3517,7 ABa	1898,9 Aa	2740,5 Aa	1918,9 Aa	2936,1 Aa
CV	1798,2 Ab	3448,9 Aa	2051,0 Aa	2968,0 Ba	1972,1 Aa	2493,2 Aa	1456,5 Aa	2627,5 Aa
Média	2530,9	3613,8	2501,4	4105,4	2324,2	2819,4	1915,0	2946,5
CV (%)	30,6							

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Catuaí Vermelho mostrou a menor eficiência, associado ao segundo maior teor foliar de nitrogênio e, a menor MST apesar de não mostrar diferenças significativas entre cultivares. Acauã e Catuaí Amarelo mostraram valores intermediários sem diferenças significativas entre elas, pelo que as diferenças com Mundo Novo poderiam ser atribuídas a diferenças relacionadas com redistribuição e/ou eficiência metabólica do nitrogênio. A eficiência de utilização indica o grau de conversão de uma unidade de nutriente em uma determinada quantidade de biomassa. Portanto, Acauã e Catuaí Amarelo apesar da maior e terceira produção de MST respectivamente dentre as variedades, alocaram maiores quantidades de nitrogênio para alcançar essas produções implicado menor eficiência.

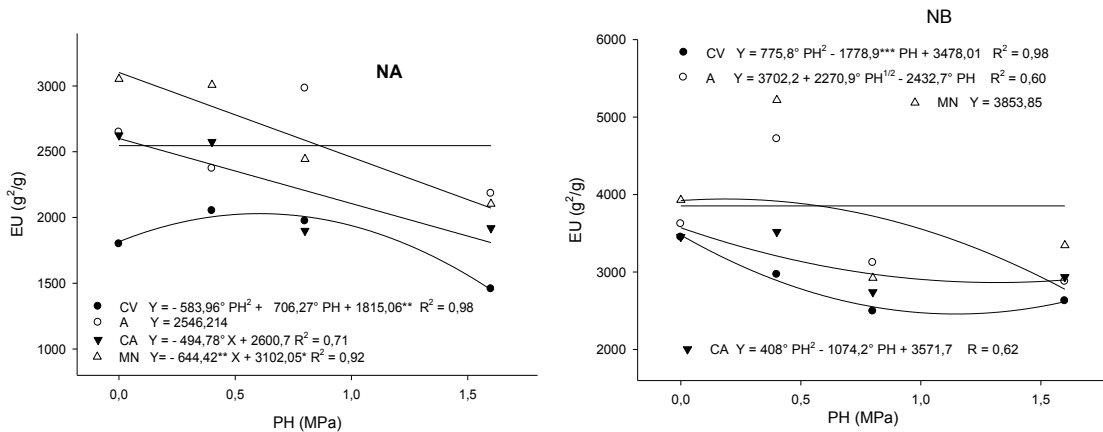
Em relação ao efeito das doses de nitrogênio dentro das cultivares e déficit hídricos, foi encontrado que no NB as cultivares tiveram maiores eficiências de utilização em todos os déficits hídricos, só no déficit -0,4 MPa nas cultivares Acauã e Mundo Novo houve efeito significativo das doses de nitrogênio, com menores valores no NA. De forma que essas cultivares mostrariam mecanismos que permitem utilizar eficientemente o nitrogênio acumulado, seja por reciclagem interna (redistribuição) ou maior eficiência metabólica do nitrogênio para produção de biomassa, mostrando os maiores valores de MST sem diferenças significativas entre cultivares. DaMatta (2002) encontrou proporcionalmente uma maior variação nos teores foliares de nitrogênio do que na fotossíntese (A), indicando que a eficiência fotossintética do uso do nitrogênio aumenta com diminuições dos teores de nitrogênio. Machado (2015) avaliando a eficiência nutricional em 13 clones de café, encontrou que ao

reduzir em 50 % a disponibilidade de nitrogênio do nível recomendando foi observado aumento da eficiência de utilização em todos os clones.

As cultivares tiveram menores eficiências de utilização nos tratamentos de NA sob déficit hídrico, mas no déficit hídrico -0,4 MPa Mundo Novo foi a cultivar que mostrou a maior eficiência sem diferenças significativas entre cultivares, pois com similar teor foliar de nitrogênio as outras cultivares ela produziu maior MST. De acordo com Birdgham et al. (1995), Silva, Furtini e Vale (1996), a eficiência de utilização diminui com maior disponibilidade do nutriente, devido a que a produção de biomassa não aumenta proporcionalmente ao acúmulo do nutriente, o que ocasiona um declínio na utilização do nutriente para produção de biomassa.

Para o efeito do déficit hídrico dentro das doses de nitrogênio e cultivares, foram ajustadas equações de regressão para verificar o padrão de resposta das cultivares em cada dose de nitrogênio (Figura 6). Para o NA todas as cultivares mostraram uma tendência de redução da eficiência com o aumento do déficit hídrico, Mundo Novo e Catuaí Amarelo se ajustaram a equações lineares, exceto para Acauã que não teve bom ajuste e Catuaí Vermelho a uma equação quadrática, com o qual foi calculado o ponto de máxima eficiência em função dos déficits (-0,6 MPa), o que representa o déficit hídrico com o qual a cultivar alcançou a máxima eficiência de utilização. Além disso, a média do teor de nitrogênio nas folhas das cultivares sob déficit hídrico diminuiu em relação ao tratamento sem déficit hídrico, em 24,5 %, 21,9 % e 17,2 % nos déficits -0,4, -0,8 e -1,6 MPa respectivamente, mostrando que com aumentos da intensidade do déficit houve aumentos dos teores foliares. Portanto, as reduções da eficiência de utilização estão acorde com o aumento dos teores foliares (Tabela 5) e a diminuição da produção média de MST (Tabela 1). Constatando que ainda com adequada disponibilidade do nitrogênio, o aumento do déficit hídrico limitou a atividade fotossintética refletindo na menor produção de MST. Nesse sentido Poorter e Nagel (2000) menciona que baixa disponibilidade hídrica reduz a taxa fotossintética por unidade de massa seca foliar.





**Figura 6.** Equações ajustadas da eficiência de utilização das cultivares em função do déficit hídrico (PH) dentro das doses de nitrogênio. \* 1%, \*\* 5%, \*\*\* 10%, ° > 10% de significância.

Para NB as tendências das cultivares foram também de redução da eficiência de utilização com aumentos do déficit hídrico similar ao ocorrido no NA, mas com maiores valores. Mostrando que na medida que aumenta o déficit ocorre diminuição na eficiência de utilização possivelmente ao se afetar processos metabólicos do uso de nitrogênio para produção de matéria seca. A eficiência de Mundo Novo não variou pelo déficit, Acauã mostrou ajuste a uma equação de raiz quadrada, Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo tiveram ajuste quadrático (Figura 6). O teor médio de nitrogênio nas folhas das cultivares mostrou ligeiro aumento apesar do efeito do déficit hídrico sobre a redução da eficiência, indicando que maiores teores de nitrogênio podem não ter uma relação diretamente proporcional com a capacidade fotossintética. Segundo DaMatta et al. (2002) o café sob limitada oferta de nitrogênio parece ter habilidade de utilizar o nitrogênio de forma mais eficiente mediante mudanças na sua alocação para componentes fotossintéticos, assim como poderia aumentar a ativação da Rubisco em função da redução dos seus níveis em condições de limitação do nitrogênio. Por outra parte a utilização de nitrogênio alocado em outros compartimentos como caule e ramos via retranslocação, contribuiria com as maiores eficiências como resposta de maximizar o uso do nutriente limitante. Amaral (2002) avaliando 4 cultivares sob três níveis de adubação encontrou que na dose de 0,4 vezes da recomendada, a alocação de nitrogênio no caule foi maior em comparação a dose normal e 1,4 vezes da recomendada, mostrando que café poderia utilizar a retranslocação como recurso para manter sua atividade metabólica em baixa disponibilidade.

### 3 CONCLUSÕES

- Diferenças entre cultivares para as eficiências avaliadas ocorreram em maior proporção nos níveis de -0,8 e -1,6 MPa de déficit hídrico, assim déficit hídrico nos maiores níveis promoveram a resposta das cultivares para eficiência de absorção e translocação, e no menor déficit para eficiência de utilização.
- Mundo Novo foi a cultivar que mostrou melhor desempenho enquanto as eficiências de absorção, translocação e utilização tanto em adequada quanto reduzida disponibilidade de nitrogênio sob déficit hídrico, indicando ser adequada para ambientes com e sem limitações de nitrogênio sob déficit hídrico.
- Para eficiência de absorção e translocação foi verificado que maior disponibilidade de nitrogênio levou a maiores valores, para eficiência de utilização menor disponibilidade levou a maiores valores.

#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fosforo por variedade de trigo: Revista Brasileira de ciência do solo, Viçosa, MG, 22:21-26. 1998.

ALI, Z. Effect of drought and nitrogen availability on osmotic adjustment of five pearl millet cultivars in the vegetative growth stage. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 202 (6) 1-12. 2016.

AMARAL, J.; MARTINEZ, H.; CRUZ, C.; NOVAIS, R.; MANTOVANI, E. Eficiência nutricional de nitrogênio e fosforo em café arábica. *Anais Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*. Rio de Janeiro: Mapa/Procafe, p. 347-348. 2002.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: Siqueira, J. O. et al. (Ed.). *Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Lavras: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 183-204. 1998.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Res*. 112, 119–123. 2009.

CARELLI, M.; FAHL, J.; RAMALHO, J. Aspects of nitrogen metabolism in coffee plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 18(1):9-21, 2006.

CHIMENTI, C.; MARCANTONI, M.; HALL, A. Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Res*. 95, 305–315. 2006.

DAMATA, F. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. *Braz. J. Plant Physiol.*, 16(1):1-6, 2004.

DAMATTA, F.; LOOS, R.; SILVA, E.; LOUREIRO, M.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. *Trees*. 16:555–558, 2002.

ERNANI, P. R. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. *Journal of Plant Nutrition*, v. 17, n. 6, p. 1067–1078. 1994.

FAROOQ, A.; WAHID, N.; KOBAYASHI D.; FUJITA, A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev*. 29 (185–212). 2009.

FIALHO, G.; SILVA, D.; REIS,.; FONSECA, A.; FERRÃO, M. Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. *Idesia*. Volumen 28, No. 3. 2010.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant Soil*, 110:101-109, 1988.

JADOSKI, S.; SAITO, L.; PRADO, C.; LOPES, E.; SALES, L. Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia* v3 n1 Jan.-Abr. 2010.

HAMBLIN A.; TENNANT, D.; PERRY, W. The cost of stress: Dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. *Plant Soil*, 122, 47-58. 1991.

HARRIS, D.; TRIPATHI, R.; JOSHI, A. On-farm seed priming to improve crop establishment and yield in dry direct-seeded rice, in: Pandey S., Mortimer M., Wade L., Tuong T.P., Lopes K., Hardy B. (Eds.), *Direct seeding: Research Strategies and Opportunities*, International Research Institute, Manila, Philippines, pp. 231–240. 2002.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Organization. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>. Acessado em: 14 de Abril de 2019.

GERLOFF, G.; GABELMAN, W. Genetic basis of inorganic plant nutrition. ed. *Inorganic plant nutrition*. New York, Springer-Verlag, p.453-480.1983.

MACHADO, L, S. Eficiência nutricional de clones de cafeeiro Conilon no estágio inicial de crescimento quanto ao nitrogênio. 2015. Dissertação (Mestrado em Produção vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Espírito Santo. Alegre, ES, 2015.

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

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 651 p. 2012.

POORTER, H., NAGEL, O. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO<sub>2</sub>, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology* 27, 595–607. 2000.

PRESTERL, T. et al. Improving nitrogen-use efficiency in European maize: estimation of quantitative genetic parameters. *Crop Science*, Madison, v. 43, n. 4, p. 1259-1265, 2003.

RIBEIRO, C.; GUIMARÃES, G.; ALVAREZ, V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 289-302. 1999.

ROCHA, B. Avaliação do metabolismo do nitrogênio em plantas jovens de cafeeiro submetidas ao déficit hídrico. 2019. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Centro de ciências agrárias. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2019.

ROCHA, G.; FERREIRA, L.; TAVARES, H.; SANTOS, M.; SOUZA, R. Cinética de absorção de nitrogênio e acúmulo de frações solúveis nitrogenadas e açúcares em girassol. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 44, n. 4, p. 381-390, 2014.

SANTOS, R.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas, R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SILVA, I. R.; FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R. Eficiência nutricional para potássio em espécies florestais nativas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 20, p. 257-264, 1996.

SOUZA, B. P. Aspectos fisiológicos e moleculares da absorção e metabolismo do nitrogênio e do déficit hídrico em café arábica. 2015. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Centro de ciências agrárias. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2015.

SUGIHARTO, B., MIYATA, K., NAKAMOTO, H., SASAKAWA, H., SUGIYAMA, T. Regulation of expression of carbon-assimilating enzymes by nitrogen in maize leaf. *Plant Physiol.* 92, 963–969. 1990.

TAIZ L.; ZEIGER, E. *Plant Physiology*, 4th Ed., Sinauer Associates Inc. Publishers, Massachusetts. 2006.

TOMAZ, M.; MARTINEZ, E.; CRUZ, C.; FREITAS, R.; PEREIRA, A.; SAKIYAMA, N. Eficiência relacionada a absorção e utilização de nitrogênio, fosforo, e enxofre em plantas de café enxertadas cultivadas em vasos. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 33, n. 4, p. 993-1001, jul./ago. 2009.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T.A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia *South African Journal of Botany*, 117: 17–25, 2018.

VILLELA, F.; FILHO, L.; SEQUEIRA, E. Tabela de déficit osmótico em função da concentração de polietileno glicol 6000 e da temperatura. *Pesquisa agropecuária brasileira*. 26 (11/12), p. 1957-1968. 1991.

WU F, Z.; BAO, W,K.; LI F,L, WU, N. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. *Environ. Exp. Bot.* 63, 248–255, 2008.

ZHANG, L. X., LI, S. X., ZHANG, H., LIANG, Z. S. Nitrogen rates and drought stress effects on production, lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities in two maize (*Zea mays* L.) genotypes. *J. Agron. Crop Sci.* 193, 387–397. 2007.

ZHONG, C.; CAO, X.; HU, J.; ZHU, L.; ZHANG, J.; HUANG, J.; JIN, Q. Nitrogen metabolism in adaptation of photosynthesis to water stress in rice grown under different nitrogen levels. *Frontiers in plant science*. V.8, 1-15. 2017.

## **CAPÍTULO 2**

### **TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA EM CAFEIRO SUBMETIDO A DÉFICIT HÍDRICO E DOSES DE NITROGÊNIO**

## RESUMO

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em cafeeiro submetido a déficit hídrico e doses de nitrogênio.** Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Kacilda Naomi Kuki.

As respostas fisiológicas das plantas em relação a estresses abióticos permitem entender a performance de genótipos em resposta a variações na disponibilidade de recursos como a água e nutrientes. De maneira destacada, o nitrogênio participa dos processos fotossintéticos como constituinte de componentes como a clorofila e a Rubisco que estão estreitamente relacionados com a produção de biomassa e consequentemente com a produtividade. Objetivou-se neste trabalho avaliar as respostas de cultivares relacionadas as trocas gasosas e parâmetros da fluorescência da clorofila em condições contrastantes de disponibilidade de nitrogênio e de água. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com plantas de 6 meses de idade cultivadas em solução nutritiva. Quatro cultivares de café arábica foram utilizadas: Mundo Novo (MN), Catuaí Amarelo (CA), Catuaí Vermelho (CV) e Acauã (A) submetidas a déficit hídrico e doses de nitrogênio. Foi utilizado esquema fatorial (4x2x4) em delineamento de blocos casualizados com 3 repetições, sendo os fatores: cultivares, doses alta e baixa de nitrogênio (NA e NB) e déficit hídrico (0, -0,4, -0,8 e -1,6 MPa) induzidos via adição de PEG (Polietileno glicol) na solução nutritiva aos 67 dias após a instalação do experimento. O período de déficit hídrico foi de 76 dias, momento no qual foram feitas medições de fotossíntese ( $A$ ), transpiração ( $E$ ) e eficiência fotoquímica do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ). Calculou-se a eficiência de carboxilação ( $EC$ ) e a eficiência do uso da água ( $EUA$ ). Em relação as trocas gasosas, na dose NA a variedade Catuaí Vermelho mostrou as menores reduções da  $A$ ,  $EC$  e maiores valores de  $EUA$  em resposta ao déficit hídrico de -0,8 MPa. O parâmetro  $F_v/F_m$  nas cultivares não foi afetado pela imposição do déficit hídrico indicando que não houve queda da eficiência fotoquímica, e que suplementação de nitrogênio não interferiu nesta resposta. Na dose de NB a cultivar Acauã mostrou menores reduções  $A$ ,  $EC$  e  $EUA$  em resposta ao déficit hídrico de -0,4 e -1,6 MPa.  $F_v/F_m$  das cultivares também não foi afetado pelos déficits hídricos impostos. Se conclui que Catuaí Vermelho na dose NA exibiu melhor desempenho das trocas gasosas e, Acauã na dose NB foi menos impactada pelo déficit hídrico.

Palavras-chave: Fotossíntese. Eficiência do uso da água. Eficiência fotoquímica.

## ABSTRACT

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, September, 2019. **Gas exchange and chlorophyll fluorescence in coffee submitted to water deficit.** Advisor: Hermínia Emília Prieto Martinez. Co-advisors: Paulo Roberto Cecon and Kacilda Naomi Kuki.

The physiological responses of the plants regarding the abiotic stresses allow understanding the performance of genotypes in response to variations on the availability of resources such as water and nutrients. To highlight, the nitrogen participates in the photosynthetic processes being the constituent of components such as chlorophyll and Rubisco that are closely related to the production of biomass and consequently to the productivity. The objective of this study was to evaluate the responses of coffee cultivars related to the gas exchange and the parameters of fluorescence of chlorophyll on contrast conditions of nitrogen and water availability. The experiment was done in greenhouse with six-month-old plants cultivated on a nutritive solution. Four *Coffea arabica* cultivars were used: Mundo Novo (MN), Catuaí Amarelo (CA), Catuaí Vermelho (CV) and Acauã (A) submitted to water deficit and nitrogen doses. A factorial scheme (4x2x4) was used, on randomized blocks design with 3 replications, being the factors: cultivars, high and low nitrogen doses (HN and LN) and water deficits (0, -0,4, -0,8 e -1,6 MPa) established via the addition of PEG (Polyethylene glycol) into the nutritive solution, after 67 days of having started the experiment. The water deficit period lasted 76 days, at that moment there were took measures of photosynthesis ( $A$ ), transpiration ( $E$ ) and photochemical efficiency from photosystem II ( $F_v/F_m$ ). The carboxylation efficiency ( $CE$ ) and the water-use efficiency ( $WUE$ ) were calculated. Regarding the gas exchange, in the NA dose, the Catuaí Vermelho cultivar showed the lower reductions of  $A$ ,  $CE$ , and higher values of  $WUE$  in response to the -0,8 MPa water deficit. The parameter of  $F_v/F_m$  in the cultivars was not affected by the imposition of water deficit, indicating that the photochemical efficiency did not decrease and the nitrogen supplementation did not interfere with that response. On the NB dose, the Acauã cultivar showed lower reductions of  $A$ ,  $CE$ , and  $WUE$  in response to water deficits of -0,4 y -1,6 MPa.  $F_v/F_m$  of the cultivars was not affected by the water deficits imposed. In conclusion, the Catuaí Vermelho in the NA dose showed a better performance of gas exchange and the Acauã in the NB dose were less affected by the water deficit.

Keywords: Photosynthesis. Water-use efficiency. Photochemical efficiency.



## 1 INTRODUÇÃO

Evidenciam-se balanços negativos em relação à utilização de recursos hídricos em amplas zonas que devido ao efeito da mudança climática impactam de forma negativa a produção de alimentos a nível mundial devido à ocorrência de secas. Além disso, o crescimento acelerado da população mundial com seu consequente aumento na demanda de alimentos vem tornando crítico o fornecimento da água para satisfazer as demandas hídricas nas áreas agrícolas. Desse modo, a produtividade pode diminuir pelos efeitos negativos da seca sobre as culturas. Segundo (Earl e Davis, 2003) três mecanismos reduzem a produtividade pelo déficit hídrico no solo: i) redução da absorção da radiação fotossinteticamente ativa, ii) diminuição na eficiência de uso da radiação e iii) redução no índice de colheita. Além disso, outros estresses de caráter abiótico podem se apresentar simultaneamente como baixa fertilidade do solo que limita ainda mais a performance das culturas. Marcadamente o nitrogênio é o que tem maior potencial de afetar a produtividade, devido a sua estreita relação com o metabolismo do carbono. Nesse sentido, o estudo das respostas fisiológicas das plantas a estresses abióticos representa uma via para identificar mecanismos de tolerância que capacitam as plantas para enfrentar uma determinada limitação no uso dos recursos.

As trocas gasosas mostram as respostas das plantas em relação às variações na oferta de recursos como água e disponibilidade de nutrientes relacionados ao metabolismo fotossintético a nível fisiológico. Assim, a avaliação das trocas gasosas permite verificar como são afetados processos como fotossíntese e transpiração, que em última instância fornecem informações sobre a capacidade dos genótipos para manter os ganhos de carbono sob um determinado evento de déficit. As limitações na fotossíntese ocorrem por várias causas, principalmente devido ao fechamento estomático, verificado pela diminuição da condutância estomática ( $g_s$ ) que está diretamente relacionada com a transpiração, a qual permite o fluxo de água via xilema contribuindo na manutenção da turgidez dos tecidos. Em condições de seca a planta evita a perda excessiva de água via fechamento estomático, o que reduz a difusão de  $CO_2$  nos espaços intercelulares da folha diminuindo sua concentração nos sítios de carboxilação, conduzindo a reduções na taxa de assimilação de  $CO_2$ . O efeito do déficit hídrico sobre fotossíntese se relaciona também com a diminuição da expansão foliar, dano a maquinaria fotossintética, senescência foliar prematura e diminuição da atividade das enzimas do ciclo de Calvin (Farooq et al, 2009). Outras informações que podem derivar dos parâmetros das trocas gasosas se referem à obtenção da eficiência no uso da água (EUA), parâmetro que relaciona a taxa

fotossintética com a taxa transpiratória indicando a quantidade de moléculas de CO<sub>2</sub> assimiladas pelo gasto de moléculas de H<sub>2</sub>O no processo, de forma que genótipos eficientes no uso da água mostram maior assimilação de CO<sub>2</sub> por unidade de água utilizada. Tal eficiência pode estar associada a características morfológicas ou fisiológicas e, mecanismos que permitem maior crescimento sob limitações hídricas, as quais envolvem maximização da absorção da água por raízes mais densas e profundas, melhor controle estomático e redução da área foliar com consequente redução da transpiração (Kramer e Boyer, 1995).

Os parâmetros mais utilizados para verificar alterações da performance fotossintética em decorrência de estresses ambientais, incluem a razão Fv/Fm, que indica a eficiência fotossintética máxima ou eficiência quântica máxima ou potencial da atividade fotoquímica do fotossistema II (Rascher et al., 2000, Baker, 2008), rendimento quântico do transporte de elétrons ( $\Phi_{PSII}$ ), taxa de transporte de elétrons (ETR) e os rendimentos quânticos: i) rendimento quântico do fotossistema II Y (II), rendimento quântico da dissipação regulada da energia não fotoquímica Y(NPQ) que representa a emissão de fluorescência e iii) rendimento quântico da dissipação não regulada da energia não fotoquímica Y(NO) que representa a emissão de calor (Baker, 2008).

Sob condições de déficit hídrico, a concentração intercelular de CO<sub>2</sub> mostra reduções, devido ao fechamento estomático, gerando decréscimos na assimilação do CO<sub>2</sub> e na eficiência quântica do fotossistema II (Baker, 2008). Dessa forma a emissão de fluorescência da clorofila pode estar associada com alterações da capacidade fotossintética. O rendimento quântico fotoquímico do fotossistema II está diretamente relacionado ao rendimento quântico de assimilação de CO<sub>2</sub> pela folha. Assim a obtenção de medidas da fluorescência permite uma rápida evidencia da assimilação de CO<sub>2</sub> de forma não destrutiva. Esses danos aos componentes fotossintéticos são chamados de limitações fotoquímicas, as quais não são detectadas mediante as medidas das trocas gasosas, portanto, a utilização conjunta com medidas da fluorescência fornece informações adicionais em relação à performance do uso da energia luminosa pelo aparelho fotossintético permitindo avaliar a eficiência fotoquímica e o estado fisiológico das plantas (Baker e Rosenqvist, 2004). Outros autores mencionam que há contundente evidencia de que os processos fotossintéticos como atividade da Rubisco, regeneração da RuBP, fornecimento de ATP, taxa de transporte de elétrons e a eficiência de captura de luz nos fotossistemas são afetados na medida que o déficit hídrico aumenta (Flexas e Medrano, 2002; Lawlor, 2002; Lawlor e Cornic, 2002; Grassi e Magnani, 2005; Zhou et al., 2007).

Estudos tem mostrado que deficiência de nitrogênio diminui o rendimento quântico do transporte de elétrons e a eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II, sugerindo que deficiência de nitrogênio pode promover dano ao fotossistema II em algum grau (Nunes et al, 1993, Verhoeven et al, 1997), outros estudos mostraram que deficiência de nitrogênio não teve efeito sobre esses parâmetros (Lu e Zhang, 2000). Portanto, a avaliação das trocas gasosas e fluorescência da clorofila constituem ferramentas complementares para verificar diferenças nas respostas entre genótipos a variações na disponibilidade de recursos, permitindo identificar aqueles com características fisiológicas favoráveis para enfrentar eventos de déficit hídrico. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as respostas das cultivares de café em relação às trocas gasosas e alguns parâmetros da fluorescência da clorofila, submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico e doses contrastantes de nitrogênio, visando identificar cultivares de adequada performance em diferentes condições de disponibilidade hídrica e de nitrogênio.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material vegetal e condições de cultivo**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento da Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, localizada nas coordenadas (20° 45' S, 42° 15' W e 650 metros de altitude), Minas Gerais. Foram utilizadas plantas jovens de cafeeiro (*C. arábica*) das cultivares Catuaí Amarelo, Catuaí vermelho, Acauã e Mundo Novo, provenientes de cultivo hidropônico com idade de seis meses. O experimento foi conduzido do 28/03/17 até 18/08/17 totalizando 143 dias. Cada unidade experimental recebeu 6,5 litros de solução nutritiva com concentrações de 7 ou 2,8 mmol/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que definiram os níveis dos tratamentos de nitrogênio alto (NA) e baixo (NB). As concentrações dos demais nutrientes se mantiveram constantes e foram: 1 mmol/L P, 4,8 mmol/L K, 1mmol/L Mg, 1 mmol/L S, 2,1 mmol/L Ca, 40 µmol Fe-EDTA, 23 µmol/L B, 0,8 µmol/L Cu, 12 µmol/L Mn, 0,3 µmol/L Mo e 1 µmol/L Zn. Cada recipiente recebeu arejamento durante todo o período de condução do experimento, e o pH foi mantido em torno de 6 ± 0,2. Foi feita reposição dos nutrientes com base na redução da CE da solução nutritiva. Sempre que a CE apresentava redução de 30% comparativamente ao seu valor inicial readicionavam-se proporcionalmente todos os macro e micronutrientes exceto o nitrogênio. Para a reposição do nitrato foi adotado o critério de redução de 30% da concentração

avaliada pelo sensor LAQUA Twin Nitrate NO<sub>3</sub> Meter®. A água transpirada foi readicionada diariamente para manter o volume da solução.

O déficit hídrico foi imposto após 67 dias de condução das plantas em diferentes doses de N. Nessa ocasião as soluções nutritivas foram trocadas e acrescidas das doses calculadas de PEG 6000 (Polietileno glicol) para gerar os seguintes potenciais hídricos da solução: 0,0; -0,4; -0,8; e -1,6 MPa de acordo com (Villela et al, 1991). As quantidades utilizadas por litro de solução para os déficits hídricos definidos foram 0,0 g; 172,6 g, 240,2 g e 335,8 g respectivamente, as quais foram fraccionadas em 6 parcelas e aplicadas diariamente de forma consecutiva para impor o déficit de forma gradativa. O déficit hídrico teve duração de 76 dias.

## **2.2 Potencial hídrico foliar**

Para estimar o efeito dos tratamentos de déficit hídrico através da utilização do Polietileno glicol (PEG) sobre o estado hídrico foliar foi utilizado uma bomba de pressão tipo Scholander conforme descrito por DaMatta et al, (1997). As medições foram feitas na antemãhã, sendo realizadas em folhas individuais e completamente expandidas localizadas no sexto par de folhas do ramo ortotrópico contado a partir da base das plantas.

## **2.3 Determinação das Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a***

As avaliações de trocas gasosas foliares incluíram fotossíntese (*A*), condutância estomática (*g<sub>s</sub>*), transpiração (*E*), concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*), que foram realizadas em folhas completamente expandidas e expostas a radiação solar, localizadas no terceiro par de folhas do ramo plagiotrópico localizado no terço superior da copa. Foi utilizado um analisador de gases portátil a infravermelho (IRGA), modelo LI-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA). As medições foram realizadas entre 08:00 e 11:00 horas, aos 76 dias após concluída a imposição do déficit hídrico, com o auxílio de luz artificial (LEDs), com fluxo de fótons fotossintéticos ajustado para 500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> na folha oposta à utilizada para trocas gasosas. Utilizando os parâmetros anteriores foi calculada a eficiência do uso da água (EUA) e a eficiência de carboxilação (EC).

Para as medidas da fluorescência da clorofila *a* foi utilizado um fluorômetro portátil com amplitude de pulso modulado (Junior-PAM, Heinz-Walz). Folhas adaptadas ao escuro por 30 minutos foram iluminadas com pulso de luz vermelha de baixa intensidade e frequência para

obtenção da fluorescência inicial ( $F_0$ ). Um pulso de luz saturante de  $6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  foi aplicado por um segundo para medir a emissão de fluorescência máxima ( $F_m$ ). Com esses parâmetros foram estimados a eficiência fotoquímica máxima ou potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ), o rendimento quântico do fotossistema II Y (II), rendimento quântico da dissipação regulada da energia não fotoquímica Y(NPQ) e o rendimento quântico da dissipação não regulada da energia não fotoquímica Y(NO).

#### **2.4 Delineamento experimental e análise estatística**

Inicialmente, as unidades experimentais (1 planta) receberam a combinação de 3 fatores, correspondentes a duas doses de nitrogênio (alta e baixa), quatro déficit hídricos (0; -0,4; -0,8; e -1,6 MPa) e quatro variedades, que compuseram um esquema fatorial em delineamento de blocos ao acaso com três repetições, porém devido à perda de registro de repetições de vários tratamentos a análise de variância dos dados foi realizada para os fatores cultivar e déficit hídrico separando-se as doses de N. Os dados foram submetidos a testes de normalidade e homogeneidade previamente à realização da análise de variância. Para verificar diferenças entre os fatores qualitativos as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo déficit hídrico foram ajustadas equações de regressão para verificar a tendência das respostas das variedades. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, no coeficiente de determinação e no comportamento do fenômeno. Independentemente da interação de maior grau ser ou não significativa optou-se pelo desdobramento da mesma devido ao interesse em estudo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Déficit hídrico foliar

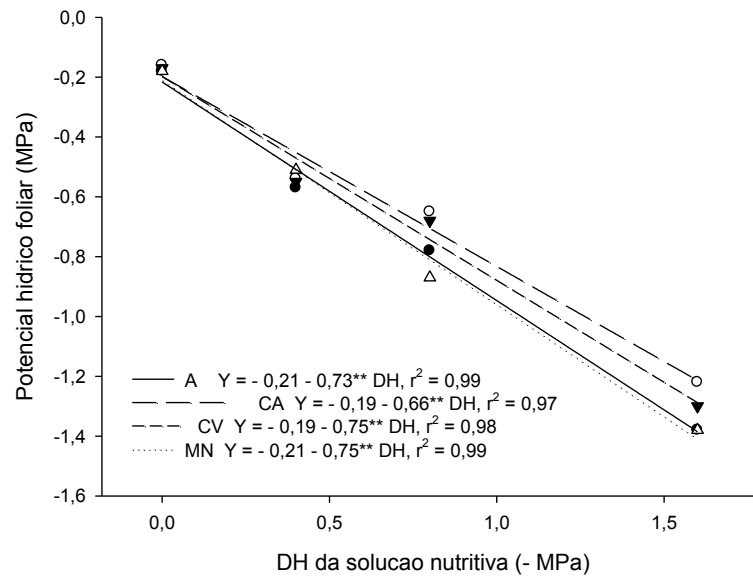
As cultivares não mostraram diferenças dentro dos déficits hídricos indicando um padrão de resposta similar em função do aumento do déficit hídrico. Segundo Jongdee et al, (2002) plantas com maior potencial hídrico foliar sob condições de déficit hídrico podem ser consideradas tolerantes em comparação a plantas menos tolerantes, devido a atuação de mecanismos que postergam a desidratação celular. O déficit hídrico foliar é usado como um indicativo do estado hídrico das plantas, o qual está sujeito a variações dependendo da disponibilidade hídrica no substrato, portanto, a resposta encontrada foi a redução desta variável indicando que a condição de déficit hídrico imposto afetou o conteúdo de água nas folhas devido à restrição no processo de absorção da água por efeito do aumento do potencial osmótico da solução nutritiva. Os déficits hídricos impostos (-0,4; -0,8 e -1,6 MPa) causaram reduções médias do potencial hídrico foliar de 4,17; 5,41 e 8,76 vezes respectivamente em relação ao tratamento sem déficit hídrico (Tabela 1).

**Tabela 1.** Potencial hídrico foliar na antemanhã de quatro cultivares de café submetidas a níveis de déficit hídrico e dose alta de nitrogênio (NA)

Variedade	Déficit hídrico (MPa)			
	0	-0,4	-0,8	-1,6
Catuaí Amarelo	-0,16 A	-0,54 A	-0,65 A	-1,22 A
Catuaí Vermelho	-0,17 A	-0,55 A	-0,68 A	-1,30 A
Acauã	-0,18 A	-0,57 A	-0,78 A	-1,38 A
Mundo Novo	-0,18 A	-0,51 A	-0,87 A	-1,38 A
Média	0,17	-0,54	-0,75	-1,32

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As equações de regressão ajustadas mostram que as cultivares tiveram uma resposta similar ao aumento da intensidade do déficit hídrico com ajuste linear, indicando que os níveis de déficit hídrico impostos limitaram a absorção de água verificado pelos valores negativos do coeficiente angular das retas (Figura 1).



**Figura 1.** Equações ajustadas do potencial hídrico foliar de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose alta de nitrogênio (NA). \*\* 1% de significância.

Trabalhos tem verificado o efeito da redução do conteúdo relativo da água nas folhas com o aumento do déficit hídrico induzido via PEG Meher et al. (2017). Resultados similares foram encontrados por Sousa (2015) e Pinto (2016) que verificaram reduções do déficit hídrico foliar uma vez impostas condições de déficit hídrico via PEG em cafeeiros jovens e adultos respectivamente. Assim, as cultivares avaliadas não apresentaram mecanismos diferenciados de conservação da água nos tecidos ou aumento da capacidade de absorção da água sob as diferentes condições de déficit hídrico, ou alternativamente, os níveis de déficits impostos não foram suficientes para gerar uma resposta que diferenciou as cultivares. Porém, em todas as cultivares a redução do parâmetro  $g_s$  seria uma tentativa de evitacão de perda de água via controle estomático, mas com efeitos sobre as taxas fotossintéticas como mostrado mais adiante.

O aumento da absorção de água mediante ajustamento osmótico pode estar relacionado à síntese de solutos compatíveis, que são compostos orgânicos e osmoticamente ativos. Essa capacidade é utilizada para acumular solutos nas células e desta forma reduzir o potencial osmótico em relação ao potencial do solo, criando um gradiente que capacita à planta para absorver água em condições de limitação hídrica. Os solutos compatíveis são principalmente aminoácidos como prolina e compostos quaternários de amônio tais como: glicina, betaína, e açúcares como manitol e sorbitol (Taiz e Zeiger, 2010). Embora DaMatta, (2004) considere a participação deste mecanismo em resposta a condições de déficit hídrico baixa e pouco efetiva para o cafeeiro, Rocha (2019) trabalhando com essas mesmas cultivares observou aumentos

lineares nas concentrações de prolina nas raízes com incremento do déficit hídrico. Em déficit -1,6 MPa as concentrações de prolina nas raízes foram da ordem de 10 vezes mais elevadas que nas raízes das plantas não submetidas a déficit, indicando que na condição mais limitante as plantas exibiram ajustamento osmótico como ajuste metabólico frente a condições de déficit hídrico. Mas a queda continua do potencial hídrico foliar nas cultivares por efeito dos déficits hídricos impostos indica que ajustamento osmótico teve uma reduzida contribuição para evitar mencionadas quedas.

### 3.2 Trocas gasosas

Dose alta de nitrogênio (31,0 g/kg de N na folha sem déficit) não promoveu diferenças da ( $A$ ) entre cultivares no tratamento sem déficit hídrico (0 MPa), da mesma forma déficit hídrico (-0,8 MPa) não foi suficiente para gerar uma resposta diferencial da fotossíntese entre cultivares. As cultivares mostraram menores valores da  $A$  por efeito do déficit hídrico; o qual desencadeia o fechamento estomático levando a diminuição da absorção da água e paralelamente limita a difusão de  $\text{CO}_2$  no interior da folha, reduzindo sua concentração intercelular que conduz a restrições no processo de assimilação. ( $A$ ) mostrou valores variando entre 4,58 e -0,3  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , valores similares foram reportados nos trabalhos de Silva et al (2004) e Chaves et al (2008) sendo considerados baixos.

Embora não tenham sido observado diferenças significativas nos valores de  $A$  entre as cultivares, verificam-se reduções significativas por efeito do déficit -0,8 MPa nas cultivares. Mundo Novo e Acauã mostraram valores negativos de  $A$ , indicando um balanço negativo de carbono, que estaria associado ao acúmulo de  $\text{CO}_2$  provavelmente derivado da respiração e da diminuição da eficiência de carboxilação. Para Catuaí Vermelho  $A$  reduziu-se em 59,4% com um déficit hídrico que pode ser considerado baixo/moderado, mas de longa duração (Tabela 2). Lawlor e Cornic (2002) mencionaram que a respiração diurna aumenta como uma proporção da troca de  $\text{CO}_2$  na medida em que cai o teor relativo de água e, é responsável pelo incremento da concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ). Sousa (2015) avaliando o efeito de curto prazo de déficit hídrico (-1,6 MPa) nas mesmas cultivares verificou reduções significativas da  $A$  em todas elas com relação ao tratamento sem déficit hídrico, sem diferenças entre cultivares, encontrando maiores reduções em Acauã e Mundo Novo e, a menor redução para Catuaí Vermelho. O padrão de resposta das cultivares foi similar no presente trabalho, mas com menores valores da ( $A$ ), evidenciando que apesar de constituir um déficit hídrico de menor intensidade (-0,8 MPa),



provavelmente sua maior duração (76 dias) teve maiores impactos sobre as reduções da ( $A$ ) nas cultivares. Assim, Catuaí Vermelho sob adequada disponibilidade de nitrogênio mostrou menor redução de  $A$  nas condições de déficit hídrico, indicando ser a cultivar menos impactada por esse déficit, e que apesar de não se apresentar diferenças entre variedades existe um mecanismo na cultivar Catuaí Amarelo que permitiu manter a taxa fotossintética positiva, em relação a Acauã e Mundo Novo onde não houve fotossíntese.

**Tabela 2.** Médias da Fotossíntese ( $A$ ) de três cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8
Cultivar	$A$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	
CV	4,58 Aa	1,86 Ab
A	4,31 Aa	(-) 0,24 Ab
MN	3,00 Aa	(-) 0,3 Ab
Média	3,96 a	0,44 b
CV	30,68	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Mundo Novo mostrou significativamente maior valor da  $C_i$  comparado com Catuaí Vermelho e Acauã no déficit 0 MPa. Mundo Novo e Acauã mostraram significativamente maiores valores da  $C_i$  em relação a Catuaí Vermelho no déficit -0,8 MPa (Tabela 3). Além disso, houve aumentos da  $C_i$  no déficit hídrico - 0,8 MPa com diferenças significativas em relação ao déficit 0 MPa, exceto para Catuaí Vermelho. Em Mundo Novo e Acauã o aumento da  $C_i$  foi acompanhado por quedas de ( $A$ ) com valores negativos, sugerindo que o aumento da  $C_i$  pode estar associado a prejuízos no processo de carboxilação e ao acúmulo de  $\text{CO}_2$  produzido pela respiração. Catuaí Vermelho mostrou similares valores de  $C_i$  nos déficits hídricos 0 e -0,8 MPa com queda da ( $A$ ), a  $g_s$  mostra reduções significativas por efeito do déficit -0,8MPa (Tabela 3) indicando que apesar da limitação estomática na entrada de  $\text{CO}_2$  na folha deve atuar um mecanismo que compensa essa limitação devido aos valores similares de  $C_i$ , o que pode estar associado ao processo de fotorrespiração, e por outra parte que limitações bioquímicas também contribuíram na queda de  $A$ , mostrando que o processo fotorrespiratório contribui a atingir os níveis de  $C_i$  similares. DaMatta et al (2002) avaliando o efeito combinado da disponibilidade de nitrogênio e hídrica (alta e baixa) sobre trocas gasosas no cafeeiro, encontraram no tratamento de alto nitrogênio efeito significativo da disponibilidade hídrica sobre ( $A$ ) com menores valores no tratamento de baixa disponibilidade hídrica, acompanhado de aumento da  $C_i$  e redução da condutância estomática ( $g_s$ ). Isso indica que limitações tanto estomáticas

quanto bioquímicas contribuíram na queda de  $A$ , porque apesar da redução de ( $g_s$ ) houve aumento de  $C_i$ , o que implica que o processo de carboxilação foi afetado em maior extensão que a entrada de  $CO_2$  na folha, levando a menor consumo de  $CO_2$  pelo processo assimilatório e, portanto, aumento de  $C_i$ . No presente trabalho, a queda da fotossíntese nas cultivares Mundo Novo e Acauã por efeito do déficit provavelmente está associada a limitações tanto estomáticas quanto bioquímicas verificadas pelo aumento de  $C_i$  e diminuição de  $g_s$ . Lawlor e Tezara (2009) mencionam que sob déficit hídrico leve e moderado, a capacidade bioquímica de assimilação de  $CO_2$  geralmente permanece inalterada. Em contraste, uma seca prolongada ou severa pode afetar os aspectos bioquímicos da fotossíntese. À medida que a seca se acentua ( $A$ ) diminui, provavelmente como consequência de uma restrição na produção de compostos intermediários para o ciclo de Calvin.

**Tabela 3.** Médias da condutância estomática ( $g_s$ ) e concentração intercelular de  $CO_2$  ( $C_i$ ) de três cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8
	$C_i$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )		$g_s$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	
CV	192,32 Ba	194,5 Ba	0,032 Aa	0,012 Ab
A	215,78 Bb	487,38 Aa	0,034 Aa	0,008 Ab
MN	301,75 Ab	501,96 Aa	0,041 Aa	0,009 Ab
Média	236,62 a	394,61 a	0,035 a	0,009 b
CV (%)	5,01		25,12	

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em relação ao parâmetro EC que indica a eficiência de carboxilação as cultivares se diferenciaram no déficit 0 MPa, com maior valor para Catuaí Vermelho seguido de Acauã e com menor valor para Mundo Novo. No déficit -0,8 MPa Catuaí Vermelho com maior valor se diferenciou de Acauã e Mundo Novo, indicando que Catuaí Vermelho apesar de diminuir sua eficiência de carboxilação por efeito do déficit hídrico foi a cultivar menos impactada (Tabela 4). Os valores de EC das cultivares acompanharam a ordem de resposta da ( $A$ ). No déficit hídrico -0,8 MPa os valores da EC foram significativamente menores em relação ao déficit 0 MPa acompanhando os valores da ( $A$ ), indicando que a atividade das enzimas envolvidas no processo de assimilação de  $CO_2$  foram afetadas pelo déficit hídrico, principalmente a Rubisco.

Acauã e Mundo Novo mostraram valores negativos indicando que a atividade da Rubisco foi comprometida. Os maiores valores de  $C_i$  nessas cultivares mostram que o consumo de  $CO_2$  pelo processo de assimilação diminuiu sugerindo que limitações bioquímicas contribuíram a

reduzir os valores de EC. Para Catuaí Vermelho a queda da EC foi causada pela queda da  $A$  já que  $C_i$  se manteve estável entre os déficits. Portanto, apesar da maior disponibilidade de nitrogênio a imposição do déficit hídrico limitou sua absorção afetando as quantidades de nitrogênio alocado na folha e contribuindo a queda da  $A$  nas cultivares. Nesse sentido, as folhas submetidas a déficit hídrico mostraram uma redução média de 22% no teor foliar de nitrogênio em relação ao tratamento sem déficit hídrico (31,0 a 24,2 g/kg), mas os aumentos da  $C_i$  foram significativos indicando que limitações bioquímicas da fotossíntese foram as responsáveis das mudanças de EC. A limitação não estomática da fotossíntese tem sido atribuída à redução da eficiência de carboxilação, redução da regeneração da ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP), redução da quantidade de Rubisco funcional, ou a inibição da atividade funcional do PSII (Zlatev e Lidon, 2005).

**Tabela 4.** Médias da eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ) de três cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,8$
	EC ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) <sup>-1</sup>	
CV	0,023 Aa	0,009 Ab
A	0,020 Aa	(-)0,0004 Bb
MN	0,010 Ba	(-)0,0006 Bb
Média	0,017 a	0,0026 b
CV (%)	27,89	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A eficiência de uso da água (EUA) não mostrou diferenças entre cultivares no déficit 0 MPa. No déficit -0,8 MPa houve diferenças entre cultivares, Catuaí Vermelho teve significativamente o maior valor seguido de Acauã e Mundo Novo com valores negativos indicando que o balanço de carbono em função do uso da água foi negativo e que Catuaí Vermelho mostrou-se a cultivar mais tolerante a esse déficit (Tabela 5). O efeito do déficit hídrico sobre a EUA das cultivares apresentou diferenças significativas com menores eficiências no déficit -0,8 MPa exceto para Catuaí Vermelho com quase o dobro em relação ao déficit 0 MPa, indicando que está cultivar foi a única que apresentou taxa fotossintética positiva, diferente do encontrado para Acauã e Mundo Novo. A maior EUA desta cultivar se relaciona mais com a menor redução de  $A$  do que com o uso mais conservativo da água, devido a que foi a variedade com maior taxa transpiratória (E) indicando menor sensibilidade dos estômatos para evitar a perda de água (Tabela 6). O fato de  $C_i$  não variar nesta cultivar por efeito do déficit

hídrico implica por uma parte redução da eficiência de carboxilação levando a menor consumo de CO<sub>2</sub> na assimilação, e por outra parte que houve produção CO<sub>2</sub> de modo que C<sub>i</sub> atingiu valores similares apesar das limitações estomáticas que foram verificadas pela queda significativa de g<sub>s</sub>, indicando que um mecanismo metabólico contribuiu com a produção de CO<sub>2</sub> intercelular. O processo fotorespiratório pode contribuir na manutenção dos valores de C<sub>i</sub>, já que o CO<sub>2</sub> produzido nessa rota metabólica, não consegue sair da folha pelo fechamento estomático ocasionado pelo déficit hídrico. Fotorrespiração é um processo dependente da luz que gera CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub> ocasionado pelo aumento das concentrações de O<sub>2</sub> induzindo a atividade oxigenase da rubisco. Fotorrespiração pode atuar como dreno de energia (ATP e NADPH), em situações em que aumenta sua produção e se reduz o consumo devido a limitações bioquímicas da fotossíntese, como acontece em condições de alta irradiância, função que acredita-se importante para impedir possíveis danos ao aparelho fotossintético, especialmente importante sob condições de estresse, como seca quando os estômatos se fecham em condições luminosas para evitar perda excessiva de água (Huner et al, 2002). Assim, a atuação desta rota metabólica pode contribuir na maior EUA da cultivar Catuaí Vermelho no déficit -0,8 MPa. Rocha (2019) avaliando as mesmas cultivares encontrou nos tratamentos de adequada nutrição nitrogenada fotorrespiração por efeito do déficit hídrico, evidenciada pelo aumento da disponibilidade de amônio que levou ao aumento da atividade da Glutamina sintetase.

Para Acauã e Mundo Novo o déficit hídrico restringiu a capacidade de assimilação de CO<sub>2</sub> com valores de transpiração similares, como indicado pelos valores negativos de *A*, assim a EUA nestas cultivares não seria considerada devido ao fato que não houve assimilação e sim produção de CO<sub>2</sub>. Vários trabalhos coincidem com esta resposta, nos quais em alto nitrogênio comparam o efeito da disponibilidade hídrica encontrando que a eficiência de uso da água foi significativamente reduzida sob déficit hídrico (Shangguan, 2000; Da Matta et al, 2002; Wu et al, 2008).

**Tabela 5.** Médias da eficiência do uso da água de quatro cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,8$
	EUA ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) <sup>-1</sup>	
CV	5,78 Ab	10,81 Aa
A	5,31 Aa	(-) 1,93 Bb
MN	3,36 Aa	(-) 2,41 Bb
Média	4,82	2,15
CV	26,98	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

DaMatta et al. (2002) mencionam que o nitrogênio não se relacionou com a condutância estomática ( $g_s$ ), independentemente dos tratamentos de disponibilidade hídrica (alta ou baixa) indicando que adequados níveis de nitrogênio podem aumentar, diminuir ou não causar efeito sobre  $g_s$ , e que essas respostas parecem depender da espécie. Shangguan (2000) encontrou sob condições de seca, que  $A$  de plantas em tratamento de alto nitrogênio foi significativamente reduzida enquanto não houve efeito do nitrogênio sobre  $g_s$ . Desta forma o efeito do nitrogênio não parece influenciar as respostas das trocas gasosas em relação aos parâmetros de condutância estomática ( $g_s$ ) e de transpiração ( $E$ ). Adicionalmente o padrão de resposta de  $g_s$  das cultivares mostrou reduções sob déficit hídrico, que conseqüentemente levaram a diminuição significativa da transpiração ( $E$ ) (Tabela 6) mostrando uma relação direta destes parâmetros. Não houve diferenças entre cultivares nos dois parâmetros tanto sem déficit quanto com déficit hídrico, mostrando que as cultivares responderam de forma similar as mudanças na disponibilidade hídrica e, por outro lado que o mecanismo comum para reduzir a perda da água seria a evitacão, associado a maior sensibilidade dos estômatos ao déficit hídrico.

**Tabela 6.** Medias da transpiração ( $E$ ) de quatro cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,8$
	E (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	
CV	0,795 Aa	0,172 Ab
A	0,796 Aa	0,127 Ab
MN	0,893 Aa	0,132 Ab
Média	0,828 a	0,143 b
CV (%)	17,41	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na dose baixa de nitrogênio (21,1 g/kg na folha sem déficit hídrico) as cultivares mostraram diferenças de  $A$  só no tratamento sem déficit hídrico (0 MPa), sendo que em baixa disponibilidade de nitrogênio Catuaí Vermelho e Acauã mostraram significativamente maiores valores de  $A$  em relação a Catuaí Amarelo e Mundo Novo sugerindo que  $A$  nestas últimas cultivares foi mais sensível a baixa disponibilidade de nitrogênio. Sob condições de déficit hídrico (-0,4 e -1,6 MPa) não houve diferenças de  $A$  entre cultivares, provavelmente devido ao efeito de dois fatores limitantes atuando sobre o processo de assimilação de CO<sub>2</sub> (Tabela 7).

Portanto, o efeito combinado de baixa disponibilidade de nitrogênio e déficit hídrico afetaram em duas formas  $A$ , sugerindo que menor disponibilidade de nitrogênio afetou atividade dos componentes fotossintéticos e, por outro lado o déficit hídrico impôs limitações na difusão do  $\text{CO}_2$  ao interior da folha diminuindo em maior extensão a capacidade de resposta das cultivares.

**Tabela 7.** Médias da Fotossíntese ( $A$ ) de quatro cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6
$A$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )			
CA	0,87 B	1,57 A	(-) 0,65 A
CV	3,07 A	0,65 A	(-)1,13 A
A	4,09 A	2,37 A	0,07 A
MN	1,28 B	1,66 A	(-) 1,60 A
Média	2,33 a	1,56 a	(-) 0,83 b
CV (%)	56,1		

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No déficit hídrico -0,4 MPa as cultivares mostraram diferentes padrões de respostas, Catuaí Vermelho teve redução de  $A$  de 78,8 % em relação a 0 MPa, acompanhada por aumentos da  $C_i$  e redução de  $g_s$  sugerindo limitação bioquímica da fotossíntese, Acauã mostrou reduções de  $A$  de 42 % com reduções de  $C_i$  e  $g_s$  em relação a 0 MPa (Tabela 8) sugerindo limitações estomáticas da fotossíntese. Catuaí Amarelo e Mundo Novo mostraram reduções de  $C_i$  e de  $g_s$ , com maiores valores da  $A$  em relação a 0 MPa, sugerindo que apesar dos parâmetros  $C_i$  e  $g_s$  apontarem para reduções de  $A$  associadas a limitações estomáticas a resposta foi de aumento, sugerindo que essas cultivares promoveram maior taxa fotossintética sob condições de déficit hídrico leve. DaMatta et al. (2002), mencionam que em condições de baixo fornecimento de nitrogênio plantas de café foram mais eficientes no uso do nitrogênio devido a uma alteração na alocação de nitrogênio nos componentes fotossintéticos. Desta maneira os maiores valores de  $A$  de Mundo Novo e Catuaí Amarelo neste déficit seriam atribuídos ao aumento da capacidade de assimilação de  $\text{CO}_2$ . Os resultados da eficiência de uso de nitrogênio apresentados na Tabela 9 do capítulo 1 mostram que neste déficit hídrico as cultivares tiveram os maiores valores médios de eficiência de uso do N, indicando provavelmente que a menor intensidade do déficit hídrico promoveu mudanças na alocação de nitrogênio que favoreceu a atividade fotossintética.

No déficit hídrico -1,6 MPa não houve diferenças de  $A$  entre cultivares. Porém, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Mundo Novo mostraram valores negativos de  $A$  indicando maior sensibilidade a condições de déficit hídrico, enquanto que em Acauã o processo de fixação e assimilação de  $\text{CO}_2$  foi menos afetado mostrando ser a única cultivar que manteve taxa fotossintética positiva. Paralelamente os valores de  $C_i$  aumentaram em todas as cultivares apesar da diminuição de  $g_s$  em relação a 0 MPa, indicando que a fotossíntese foi limitada principalmente por causas bioquímicas (Tabela 8). No trabalho de Sousa (2015) as mesmas cultivares avaliadas neste trabalho mostraram queda de  $A$  com imposição de déficit hídrico de curto prazo (96 horas) com diferenças significativas em relação ao controle sem déficit, portanto, a resposta de  $A$  das cultivares neste trabalho teve marcada influência da duração do déficit hídrico. No trabalho de Praxedes (2006) quatro clones foram submetidos a déficit hídrico de -2 MPa atingido em um período de 15 a 29 dias dependendo do clone, encontrando reduções significativas da  $A$  em relação ao tratamento sem déficit hídrico com valores entre 2 e 4  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{CO}_2$ . Pode-se verificar que apesar da maior intensidade do déficit hídrico imposto via supressão da irrigação, os valores da  $A$  neste trabalho foram bem menores (entre 0,07 e -1,6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) mostrando que maior duração do déficit teve um efeito mais limitante.

**Tabela 8.** Médias da condutância estomática ( $g_s$ ) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) de quatro cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6
	$g_s$ ( $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			$C_i$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )		
CA	0,022 B	0,017 A	0,005 A	368,06 A	284,94 A	652,54 A
CV	0,039 AB	0,015 A	0,003 A	283,03 A	342,94 A	1159,76 A
A	0,045 A	0,018 A	0,003 A	283,07 A	210,68 A	907,37 A
MN	0,023 B	0,016 A	0,006 A	336,22 A	247,98 A	896,13 A
Média	0,032 a	0,017 b	0,004 c	317,6 b	271,64 b	903,95 a
CV (%)	35,58			55,95		

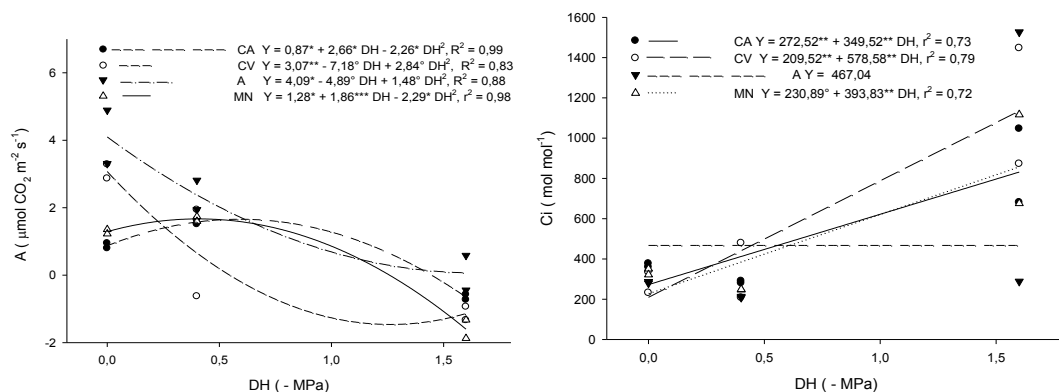
As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os valores de  $A$  das cultivares apresentaram variação inversa aos valores da  $C_i$ , indicando que  $C_i$  mostrou a usual resposta estabelecida pelo consumo de  $\text{CO}_2$  no processo de assimilação, onde maior  $A$  conduz a menor  $C_i$  (Tabela 8). O padrão de resposta da  $C_i$  das cultivares em função do aumento dos déficits hídricos, mostrou este comportamento exceto para Acauã que não teve ajuste indicando que os déficits hídricos não afetaram a resposta de  $C_i$  (Figura 1). Considerando a resposta da  $g_s$ , Catuaí Amarelo e Mundo Novo mostraram menores valores que

levaram a menores valores da  $A$ , mas com incrementos na  $C_i$  indicando que limitações bioquímicas tomaram parte na resposta de  $A$  nestas cultivares.

O efeito dos déficits hídricos sobre a  $A$  das cultivares de forma geral foi de redução na medida que aumentou a intensidade do déficit. A diminuição da taxa fotossintética sob déficit hídrico observada em muitos estudos é frequentemente explicada por uma concentração interna reduzida de  $\text{CO}_2$  que resulta em uma limitação da fotossíntese no sítio receptor da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase / oxigenase (Rubisco) (Cornic et al. 1992) ou pela inibição direta de enzimas fotossintéticas como Rubisco (Haupt-Herting e Fock, 2000) ou ATP sintase (Tezara et al., 1999; Nogués e Baker, 2000).

Equações de regressão ajustadas mostram o padrão de resposta da  $A$  das cultivares em função dos déficits hídricos (DH). As cultivares mostraram uma tendência de redução da  $A$  na medida que aumentaram os déficit hídricos, Acauã e Catuaí Vermelho mostraram uma queda contínua ajustando-se a equações quadráticas, da mesma forma Mundo Novo e Catuaí Amarelo mostraram ajuste a equações quadráticas, porém com leve aumento de  $A$  até os pontos de máximo, que ocorreram em déficit hídrico de -0,41 e -0,59 MPa respectivamente, com posterior queda. A linha de ajuste da Acauã indica que a  $A$  desta cultivar foi a menos afetada pelo aumento do déficit hídrico sob baixa disponibilidade de nitrogênio (Figura 1).



**Figura 1.** Equações ajustadas da fotossíntese ( $A$ ) e concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5%, \*\*\* 10%, ° > 10% de significância.

A redução de  $A$  em baixo nitrogênio e sob déficit hídrico poderia ser atribuída a limitações bioquímicas uma vez que a redução de  $A$  foi acompanhada por aumentos de  $C_i$  com correspondentes reduções de  $g_s$ , indicando que limitações estomáticas também contribuíram.



Ni e Pallardy (1992), Leidi (1993) mencionam que em condições de deficiência hídrica quando  $C_i$  aumenta com reduções de  $g_s$  o decréscimo de  $A$  é causado em parte pelo aumento da resistência estomática, mas também pelo decréscimo na eficiência de carboxilação associado a altos valores de  $C_i$  e baixos valores de  $g_s$ . Adicionalmente, sob limitação de nitrogênio e hídrica a redução da  $A$  foi correlacionada com a concentração foliar de nitrogênio e não com a  $g_s$  (DaMatta et al, 2002), indicando que o aumento da  $C_i$  é provavelmente reflexo da limitada capacidade de assimilação de  $CO_2$ .

Em relação a EC as cultivares mostraram diferenças no déficit 0 MPa, Acauã teve o maior valor seguida de Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Catuaí Amarelo com o menor valor. Os maiores valores de Acauã e Catuaí Vermelho indicam maior capacidade de assimilação de  $CO_2$  devido a que com menores valores de  $C_i$  em relação a Mundo Novo (21,1%) e Catuaí Amarelo (15,8%) mas sem diferenças significativas, elas conseguem maiores valores de  $A$ , verificando-se assim sua maior eficiência de carboxilação. As variações de EC acompanharam as mudanças de  $A$ , sugerindo que EC em parte é um fator explicativo da  $A$ .

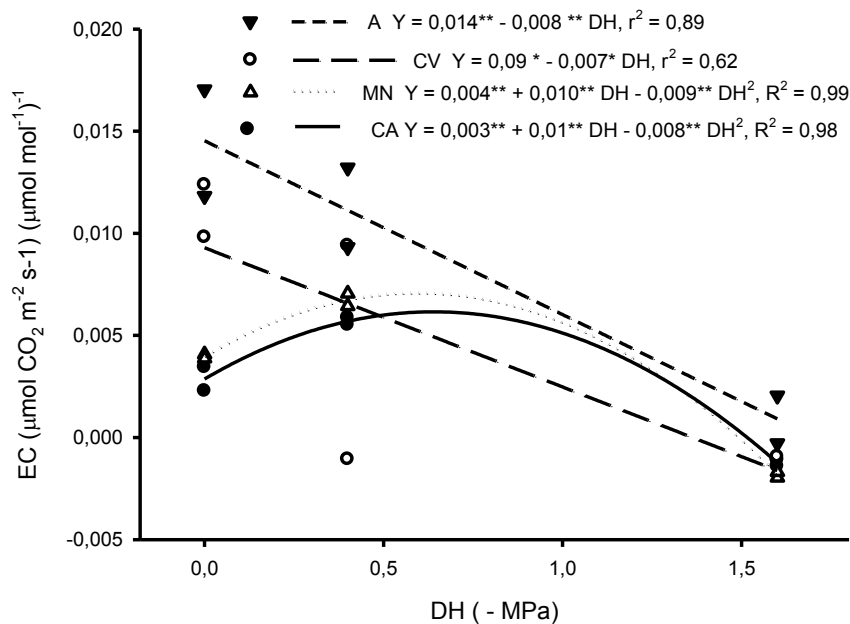
Nos déficits -0,4 MPa e -1,6 MPa não houve diferenças significativas entre cultivares indicando que todas foram impactadas de forma similar, no déficit -1,6 MPa EC mostrou valores negativos indicando que foi bastante limitada podendo-se considerar que não houve processo de carboxilação, exceto para Acauã que mostrou um valor positivo devido as menores quedas da  $A$  dentre as cultivares, sugerindo que a eficiência de carboxilação nesta cultivar foi a menos impactada por efeito dos déficits hídricos (Tabela 9).

**Tabela 9.** Médias da eficiência de carboxilação (EC) de quatro cultivares de café na dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6
EC ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) <sup>-1</sup>			
CA	0,003 C	0,006 A	(-) 0,0001 A
CV	0,011 AB	0,004 A	(-)0,001 A
A	0,014 A	0,011 A	0,001 A
MN	0,004 BC	0,007 A	(-)0,002 A
Média	0,008 a	0,007 a	(-) 0,0005 b
CV (%)	52,64		

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nos déficits hídricos -0,4 MPa e -1,6 MPa EC foram menores, exceto para Catuaí Amarelo e Mundo Novo no déficit -0,4 MPa, que mostraram maiores valores de  $A$  em relação ao tratamento sem déficit hídrico conduzindo a maior EC. O efeito do déficit hídrico afetou a capacidade metabólica das enzimas envolvidas no processo de assimilação de carbono mostrando queda da eficiência de carboxilação em todas as cultivares com a aumento dos déficits hídricos. As equações de regressão mostram que Acauã e Catuaí Vermelho mostram uma queda continua com ajuste linear, Mundo Novo e Catuaí Amarelo se ajustaram de forma quadrática, indicando algum grau de tolerância até os pontos de máxima (0,55 e 0,63 MPa respectivamente) como ajuste para manter o processo de assimilação de  $\text{CO}_2$ . Desta forma em condições de baixa disponibilidade de nitrogênio déficits hídricos entre -0,4 e -0,6 MPa geram uma resposta de ajuste nestas cultivares de modo a manter o processo de carboxilação. Acauã mostra que apesar da queda de EC as menores reduções dentre as cultivares indicam que nestas condições é a cultivar menos impactada por esses déficits, e que as limitações estomáticas de  $A$  nesta cultivar também contribuíram na queda de EC (Figura 2).



**Figura 2.** Equações ajustadas da eficiência de carboxilação ( $A/C_i$ ) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5%, de significância.

A eficiência de uso da água (EUA) não mostrou diferenças significativas entre as cultivares nos déficits hídricos (Tabela 10), mas observando-se os padrões de resposta das cultivares em função do aumento dos déficits através das equações de regressão ajustadas

(Figura 3), verifica-se redução à medida que aumentou a intensidade do déficit hídrico exceto para a cultivar Acauã, a qual não teve ajuste, indicando que os déficits hídricos tiveram um impacto limitado sobre EUA e, que essa cultivar mostra estabilidade no aproveitamento da água como ajuste para a manutenção de  $A$  o que reflete-se nas menores reduções dessa variável, assim mesmo mostrou maiores valores que Catuai Vermelho e Mundo Novo.

Catuai Amarelo mostrou 73,3% menor valor de EUA em relação a Acauã no déficit 0 MPa sem diferenças estatísticas entre cultivares, em condições de déficit hídrico apesar de diminuir sua EUA mostra-se menos impactada que Catuai Vermelho e Mundo Novo, comportamento que seria vantajoso quando da ocorrência de períodos de seca, diferentemente do comportamento de Catuai Vermelho e Mundo Novo, que em condições de déficit hídrico mostraram queda continua da EUA.

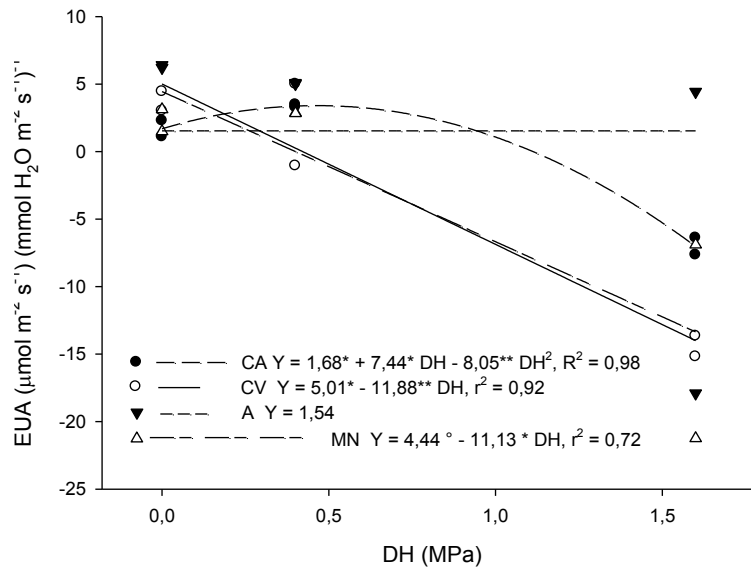
**Tabela 10.** Médias da eficiência do uso da água (EUA) e transpiração (E) de quatro cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis déficits hídricos ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6
	EUA ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) <sup>-1</sup>			E ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		
CA	1,68 A	3,37 A	(-) 7,03 A	0,606 A	0,466 A	0,092 A
CV	3,72 A	1,96 A	(-) 14,42 A	0,845 A	0,490 A	0,078 A
A	6,30 A	5,04 A	(-) 6,73 A	0,651 A	0,471 A	0,078 A
MN	2,30 A	2,85 A	(-) 14,07 A	0,628 A	0,584 A	0,140 A
Média	3,50 a	3,31 a	(-) 10,56 b	0,683 a	0,503 a	0,097 b
CV (%)	407			38,51		

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No déficit hídrico -0,4 MPa Acauã e Catuai Vermelho mostraram reduções da EUA em relação ao déficit 0 MPa e, Catuai Amarelo seguido de Mundo Novo tiveram aumento ocasionado pelo aumento de  $A$ . No déficit hídrico -1,6 MPa os baixos valores da  $A$  nas cultivares conduziram a valores negativos da EUA indicando que a maior limitação hídrica imposta afetou a difusão de  $\text{CO}_2$  gerando um balanço de carbono negativo. Nesse sentido, a resposta de  $g_s$  das cultivares (Tabela 8) mostrou que à medida que aumentaram os déficits hídricos os valores foram diminuindo, de forma que houve uma limitação estomática tanto para transpiração quanto para difusão de  $\text{CO}_2$  nas folhas, que acompanharam as reduções da EUA com aumento dos déficits hídricos. Vários estudos mostram respostas similares de redução da eficiência no uso da água em função da imposição de déficit hídrico, em Hibisco (Farooq et al, 2005), no cafeeiro (DaMatta et al, 2002; Sousa 2015), e *Sophora davidii* um arbusto perenne (Wu et al. 2008).

As reduções nos valores de EUA conforme o aumento dos déficits hídricos foram ocasionadas pelas reduções de  $A$  proporcionalmente maiores que da transpiração ( $E$ ). No déficit hídrico 0 MPa a EUA de Acauã foi 69% maior em relação a Catuaí Vermelho mas sem diferenças estatísticas entre as cultivares, sendo Acauã proporcionalmente mais eficiente no uso da água devido a que com menor taxa transpiratória consegue assimilar mais  $\text{CO}_2$  do que Catuaí Vermelho. Mundo Novo seguida de Catuaí Amarelo com menores valores, transpiraram quantidades similares a Acauã, mas suas taxas fotossintéticas foram baixas conduzindo a menores EUA.



**Figura 3.** Equações ajustadas da eficiência no uso da água fotossíntese (EUA) das cultivares em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5%, de significância.

As resposta das cultivares mostraram limitações nas trocas gasosas em termos de redução da taxa fotossintética ( $A$ ), a taxa transpiratória ( $E$ ) e a condutância estomática ( $g_s$ ) com reflexos sobre a eficiência do uso da água, indicando que o fechamento estomático não contribuiu a melhorar a eficiência no uso da água sob déficit hídrico, sendo  $A$  mais associada com as quedas de EUA.

### 3.3 Parâmetros da fluorescência da clorofila *a*

#### 3.3.1 Razão Fv/Fm

O parâmetro Fv/Fm representa a eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII) indicando a capacidade de aproveitamento da energia luminosa que é direcionada para a fase fotoquímica da fotossíntese. Parâmetro que tem sido utilizado para detectar alterações no aparelho fotossintético causadas por estresses bióticos e abióticos, de forma que diminuição desta razão indica inibição da atividade fotoquímica. Valores entre 0,8 e 0,83 são geralmente encontrados em folhas de plantas superiores não estressadas segundo Bjorkman e Demmig (1987).

Na dose alta de nitrogênio (NA) as cultivares não se diferenciaram nos déficits hídricos 0 e -0,8 MPa, indicando que a capacidade de aproveitamento fotoquímico da energia luminosa foi pouco afetada pela imposição do déficit hídrico (Tabela 11). Maxwell e Johnson (2000) mencionam que a razão Fv/Fm é usualmente utilizada como indicador do grau de fotoinibição do fotossistema II. O valor médio da razão Fv/Fm (0,69) das cultivares no tratamento sem déficit hídrico (0 MPa) menor do que estabelecido para plantas não estressadas, pode indicar que as condições gerais do cultivo se mostraram inadequadas aumentando a susceptibilidade das plantas a fotoinibição, a qual não esteve associada a disponibilidade de nitrogênio e hídrica já que foram fatores não limitantes. A variedade Mundo Novo mostrou o menor valor da Fv/Fm (0,64), portanto, a mais sensível ao aproveitamento da energia luminosa para uso na fase fotoquímica da fotossíntese, o que é corroborado pela sua menor taxa fotossintética dentre as cultivares (Tabela 2). Catuaí Vermelho mostrou o maior valor de Fv/Fm (0,73) este resultado ainda que não significativo, é um indicativo que a capacidade de aproveitamento da energia luminosa desta cultivar foi a menos afetada em relação a referência (0,8), fato que foi verificado pela sua maior taxa fotossintética dentre as cultivares (Tabela 2).

**Tabela 11.** Médias da eficiência fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fm) de três cultivares de café em dose alta de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8
CV	0,734 Aa	0,685 Aa
A	0,692 Aa	0,613 Aa
MN	0,644 Aa	0,632 Aa
Média	0,690 a	0,643 a
CV (%)	7,8	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna para cada déficit hídrico e minúscula na linha entre déficits não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Da mesma forma sob déficit hídrico (-0,8 MPa) as cultivares não se diferenciaram mostrando um valor médio de 0,64 menor em relação a referência e, menor 6,8 % em relação as plantas sem déficit hídrico mas sem diferenças significativas, indicando que este parâmetro foi pouco afetado pelo efeito do déficit hídrico. Resultados similares foram encontrados por Lima et al, (2002) e DaMatta et al, (2002) com imposição de déficits hídricos que geraram potenciais hídricos foliares de -3 MPa e -2,38 MPa respectivamente, onde a razão  $F_v/F_m$  diminuiu sem diferença significativa em relação ao tratamento sem déficit hídrico. Chaves et al (2008) encontraram em condições de campo, valor da  $F_v/F_m$  de 0,66 em folhas de cafeeiro expostas ao sol e nas sombreadas de 0,73 mostrando que maior disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa favoreceu a ocorrência de fotoinibição, com o que aumenta a quantidade de energia luminosa que não é utilizada na fotossíntese. Neste déficit a cultivar Acauã mostrou a menor razão  $F_v/F_m$  (0,61) sem diferenças significativas entre as cultivares indicando menor capacidade de aproveitamento da energia luminosa pelo aparelho fotossintético, o que corresponde com a sua menor taxa fotossintética dentre as cultivares. Catuaí Vermelho mostrou o maior valor  $F_v/F_m$  (0,68) acompanhado da maior taxa fotossintética dentre as cultivares. Porém, devido ao reduzido efeito do déficit hídrico sobre a eficiência fotoquímica das cultivares as quedas da fotossíntese estariam mais associadas com limitações bioquímicas como indicado pelas trocas gasosas.

Guo e Cao (2004) encontraram que baixas temperaturas noturnas provocaram diminuição das taxas de trocas gasosas e também da razão  $F_v/F_m$  com incrementos da dissipação não fotoquímica em cafeeiros, sendo essas respostas mais acentuadas em mudas sob condições de alta irradiância. Silva et al (2004) mencionam que a redução na  $F_v/F_m$  poderia ser consequência e não causa da diminuição da capacidade de assimilação de carbono, devido ao menor consumo de ATP e NADPH em função das menores taxas fotossintéticas. Portanto, no período de inverno (onde foram feitas as avaliações no presente trabalho), as condições ambientais provavelmente contribuíram na diminuição da razão  $F_v/F_m$  devido as baixas temperaturas noturnas e, alta irradiância no dia seguinte que gerou excesso de energia luminosa no aparelho fotossintético, aumentando a susceptibilidade de fotoinibição.

Na dose baixa de nitrogênio (NB) as cultivares não se discriminaram nos déficits hídricos 0, -0,4 e -1,6 MPa, com ligeiras reduções nos valores médios da  $F_v/F_m$  na medida que se

intensificou o déficit hídrico, mostrando que a capacidade de aproveitamento da energia luminosa pelo aparelho fotossintético foi pouco impactada pelos déficits (Tabela 12). Os valores médios em cada déficit hídrico se mostram abaixo do valor de referência (0,8 - 0,83) de folhas não estressadas, indicando que em todos os déficits hídricos poderia estar ocorrendo uma maior propensão a fotoinibição nas condições vigentes de cultivo. Ou, ainda, que o valor médio aproximado de 0,65, para todos os tratamentos, pode ser uma característica intrínseca da espécie. Da Matta et al (2002) não encontraram diferenças nos valores Fv/Fm dentro do tratamento de baixo nitrogênio ao comparar plantas controle com as submetidas a déficit hídrico, mas com valores em torno de 0,78. Lu e Chang (2000) não encontraram mudanças substanciais na razão Fv/Fm no tratamento de deficiência de nitrogênio em relação ao tratamento de alto nitrogênio, sugerindo pouco efeito da limitada disponibilidade de nitrogênio sobre a fotoquímica do fotossistema II sob pleno sol.

**Tabela 12.** Médias da eficiência fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fm) de quatro cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

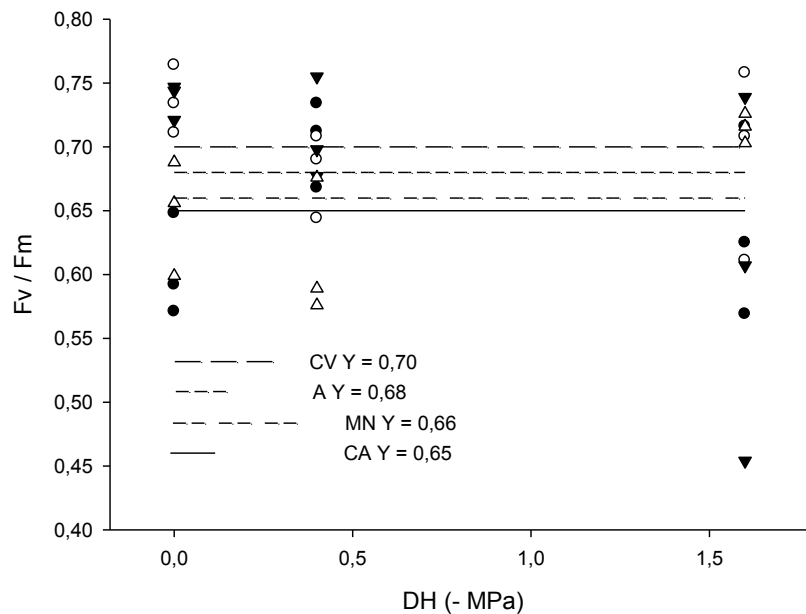
Cultivar	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,4	$\Psi_w$ -1,6
CA	0,603 A	0,704 A	0,636 A
CV	0,736 A	0,680 A	0,692 A
A	0,737 A	0,710 A	0,600 A
MN	0,647 A	0,613 A	0,715 A
Média	0,681 a	0,677 a	0,661 a
CV (%)	9,1		

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No trabalho de Pompelli et al. (2010) sob tratamento de baixo nitrogênio e pleno sol foi encontrado valor médio de 0,65, similar aos valores encontrados no presente trabalho que variaram entre (0,66 e 0,68). Esses autores mencionam que a redução do valor Fv/Fm se relacionou com ajustes na captura da luz e dissipação do excesso de energia; encontrando que redução na concentração da clorofila *a* e *b* no tratamento de baixo nitrogênio diminuíram a absorção de luz, o que pode contribuir a atenuar os efeitos deletérios de alta irradiância, encontrando-se que em baixas temperaturas noturnas ocorreu retenção da zeaxantina a qual tem a capacidade de dissipar o excesso de luz absorvida, o que pode indicar maior capacidade fotoprotetora. Portanto, a atuação destes mecanismos provavelmente influenciaram na redução dos valores da Fv/Fm encontrados no presente trabalho, tanto nos tratamentos com déficit quanto sem déficit, sendo está resposta provavelmente associada a redução da concentração de

clorofilas, mas não poderia se associar ao aumento da capacidade de dissipação de energia via ciclo das xantofilas, devido a que o parâmetro  $Y$  (NPQ) associado com essa via mostrou os menores valores.

Em relação ao efeito dos déficits hídricos sobre a  $F_v/F_m$  das cultivares observa-se que não houve ajuste de modelo de regressão para nenhuma delas, pelo que o ajuste foi definido pelos valores médios indicando que aumento da intensidade dos déficits não afetaram o padrão de resposta das cultivares em relação a capacidade de aproveitamento da energia luminosa para fotossíntese em condições de menor disponibilidade de nitrogênio (Tabela 12). Por outra parte, essa resposta indica que as cultivares foram impactadas de forma similar e, que não exibiram algum mecanismo que permitiu melhorar o aproveitamento fotossintético da energia luminosa o que se reflete nas quedas da  $A$  (Tabela 7).



**Figura 4.** Equações ajustadas da eficiência fotoquímica do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5% de significância.

### 3.3.2 Rendimentos quânticos

O aproveitamento da energia luminosa que é captada pelo aparelho fotossintético pode-se expressar em termos dos rendimentos quânticos, que representam a fração da energia solar que é utilizada pelo aparelho fotossintético nos processos fotoquímicos e não fotoquímicos, os



quais dissipam a energia direcionando-a para fotossíntese, e para vias que reduzem o excesso de energia prevenindo danos celulares associados a altas irradiâncias. Y(II) é o rendimento quântico do PS II e pode ser considerado uma boa medida do aproveitamento ou utilização da energia luminosa para fotossíntese. Y (NPQ) é o rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica e, representa a fração de energia que é dissipada na forma de calor e, Y (NO) corresponde a fração da energia luminosa que é dissipada de forma não regulada como calor e fluorescência.

Na dose alta de nitrogênio (NA) a maior proporção da energia solar captada pelas folhas foi dissipada fotoquimicamente representada pelo Y (II) seguida pela dissipação não regulada Y (NO) e, em menor proporção pela dissipação regulada de calor Y (NPQ) tanto nos tratamentos sem déficit hídrico quanto com déficit hídrico. As cultivares não se diferenciaram no tratamento sem déficit hídrico (0 MPa) assim como no déficit -0,8 MPa onde os valores médios de Y (II) foram 7,3 % menores em relação a 0 MPa, indicando que apesar da limitação hídrica as cultivares não alteraram significativamente a quantidade de energia que captam e direcionam para a fase fotoquímica da fotossíntese (Tabela 13). Catuaí Vermelho apresentou os maiores valores de Y (II) tanto sem déficit 0 MPa quanto no -0,8 MPa indicando menor impacto do déficit hídrico sobre o aproveitamento fotossintético da energia luminosa. Acauã mostrou os menores valores sem déficit 0 MPa e déficit -0,8 MPa, com reduções de 9,6 % e 9,7 % respectivamente em relação a Catuaí Vermelho, mostrando menor aproveitamento da energia luminosa nessas condições.

**Tabela 13.** Médias dos rendimentos quânticos de três cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NA) e dois níveis de déficit hídrico ( $\Psi_w$ )

Cultivar	Y (II)		Y (NO)		Y(NPQ)	
	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8	$\Psi_w$ 0	$\Psi_w$ -0,8
CV	0,709 Aa	0,659 Aa	0,272 Aa	0,302 Aa	0,017 Aa	0,038 Aa
A	0,641 Aa	0,595 Aa	0,334 Aa	0,367 Aa	0,024 Aa	0,037 Aa
MN	0,667 Aa	0,614 Aa	0,317 Aa	0,360 Aa	0,015 Aa	0,024 Aa
Média	0,672 a	0,623 a	0,307 a	0,343 a	0,019 a	0,033 a
CV (%)	6,4		13,8		66,6	

As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Com relação à dissipação via Y (NPQ) não houve diferenças entre cultivares nos déficit 0 e -0,8 MPa, mas houve aumento de 73,7 % nos valores médios do Y (NPQ) por efeito do

déficit hídrico (-0,8 MPa) sem diferenças significativas, indicando que em condições de déficit está via contribuiu na dissipação da energia luminosa que não é utilizada na fase fotoquímica, mas sua magnitude é menor em relação a dissipação Y(NO), a qual também mostrou aumentos médios de 11,7% em resposta ao déficit hídrico, desta forma os aumentos dos valores da dissipação Y (NPQ) e Y (NO) indicam que as cultivares mostraram menor aproveitamento da energia luminosa incidente para dissipação fotoquímica, que corresponderam com as quedas da fotossíntese.

Assim, todas as cultivares mostraram quantitativamente um aproveitamento similar da energia luminosa para a fotossíntese tanto com déficit quanto sem déficit hídrico, assim como similar capacidade na dissipação não fotoquímica, indicando que déficit hídrico pouco afetou o aproveitamento da energia luminosa pelo aparelho fotossintético. Tais resultados sugerem que as quedas nas taxas fotossintéticas das cultivares estiveram mais associadas a limitações bioquímicas como verificado pelas trocas gasosas através do parâmetro EC.

Na dose baixa de nitrogênio (NB) a maior proporção da energia luminosa foi dissipada via fotoquímica Y (II) seguida pela dissipação não fotoquímica não regula na forma de calor e fluorescência Y (NO) e, em menor proporção a dissipação não fotoquímica regulada na forma de calor Y (NPQ) com padrão de resposta similar nos tratamentos com e sem déficit, indicando que déficit hídrico pouco alterou tal distribuição (Tabela 14). Krause e Weis (1991) mencionam que déficit hídrico pode levar a uma redução inicial em Y (II), aumento em Y (NPQ) e um declínio em  $F_v/F_m$ , ligado a perda de funcionalidade do aparato fotossintético.

Nos tratamentos sem déficit hídrico (0 MPa) as cultivares não se diferenciaram em quanto a Y(II), da mesma forma que nos déficits -0,4 e -1,6 MPa, indicando que apesar do aumento da intensidade do estresse hídrico as cultivares absorveram quantidades similares de energia luminosa para fotossíntese. Mas houve queda do valor médio no déficit hídrico -1,6 MPa em relação ao tratamento sem déficit indicando que houve que alguma alteração no aparelho fotossintético. Pompelli et al. (2008) encontraram menores concentrações de clorofilas em plantas cultivadas a pleno sol e baixo nitrogênio, independentemente dos níveis de nitrogênio foliar, indicando que essa mudança seria considerada um mecanismo de ajuste entre a absorção e a utilização da luz na fotossíntese.

**Tabela 14.** Médias dos rendimentos quânticos de quatro cultivares de café em dose baixa de nitrogênio (NB) e três níveis de déficit hídricos ( $\Psi_w$ ).

Cultivar	Y (II)			Y (NO)		
	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,4$	$\Psi_w -1,6$	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,4$	$\Psi_w -1,6$
CA	0,594 A	0,646 A	0,572 A	0,375 A	0,328 A	0,337 A
CV	0,640 A	0,652 A	0,599 A	0,219 B	0,305 A	0,348 A
A	0,682 A	0,655 A	0,554 A	0,272 AB	0,295 A	0,379 A
MN	0,593 A	0,614 A	0,633 A	0,347 AB	0,353 A	0,290 A
Média	0,627 a	0,642 a	0,590 a	0,303 a	0,320 a	0,339 a
CV (%)	11,6			17,6		

Cultivar	Y (NPQ)		
	$\Psi_w 0$	$\Psi_w -0,4$	$\Psi_w -1,6$
CA	0,030 B	0,025 A	0,090 A
CV	0,139 A	0,041 A	0,051 A
A	0,045 B	0,049 A	0,066 A
MN	0,059 AB	0,032 A	0,076 A
Média	0,068 a	0,037 a	0,071 a
CV (%)	68,8		

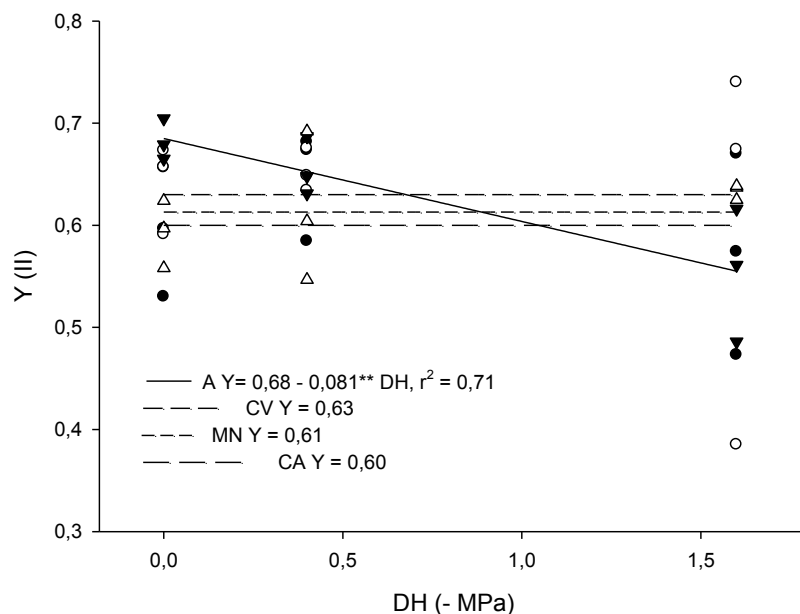
As medias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada déficit hídrico não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As cultivares mostraram diferenças do parâmetro Y (NPQ) no déficit 0 MPa, Catuaí Vermelho teve o maior valor indicando ser a cultivar que dissipa maior proporção da energia captada na forma de calor e, por tanto mais adequada para ambientes com maior oferta de radiação solar e menos susceptível a fotoinibição como verificado pelo maior valor Fv/Fm. Nos potenciais hídricos -0,4 e -1,6 MPa não houve diferenças entre cultivares, com diminuição no déficit -0,4 MPa e ligeiro aumento no déficit -1,6 MPa respectivamente em relação ao tratamento sem déficit, mas em termos relativos a contribuição desta via de dissipação foi reduzida devido a sua baixa proporção em relação a Y (NO).

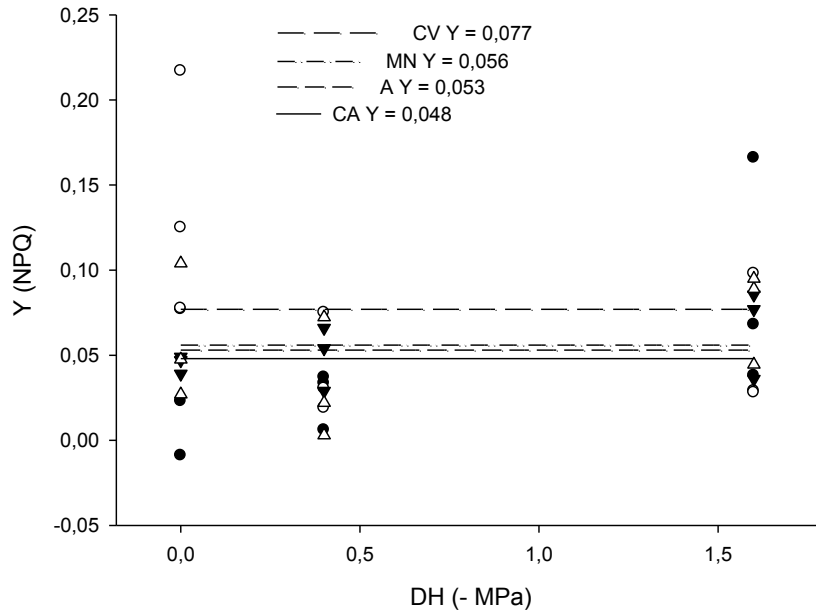
Em relação a Y (NO) as cultivares só se diferenciaram no déficit 0 MPa, mostrando que Catuaí Amarelo mostrou o maior valor, indicando uma maior participação desta via na dissipação de energia. Na medida que se intensificou o déficit hídrico aumentaram os valores médios. De acordo com Klughammer e Schreiber (2008) em condições de alto fluxo fotônico altos valores de Y (NPQ) indicam alta capacidade fotoprotectora e altos valores de Y (NO) indicam incapacidade na dissipação do excesso de energia e de evitar fotodanos, portanto, no

presente trabalho os maiores valores de Y (NO) em relação a Y (NPQ) indicariam maior susceptibilidade a fotodanos o que se relacionaria com os valores de Fv/Fm encontrados (Tabela 12).

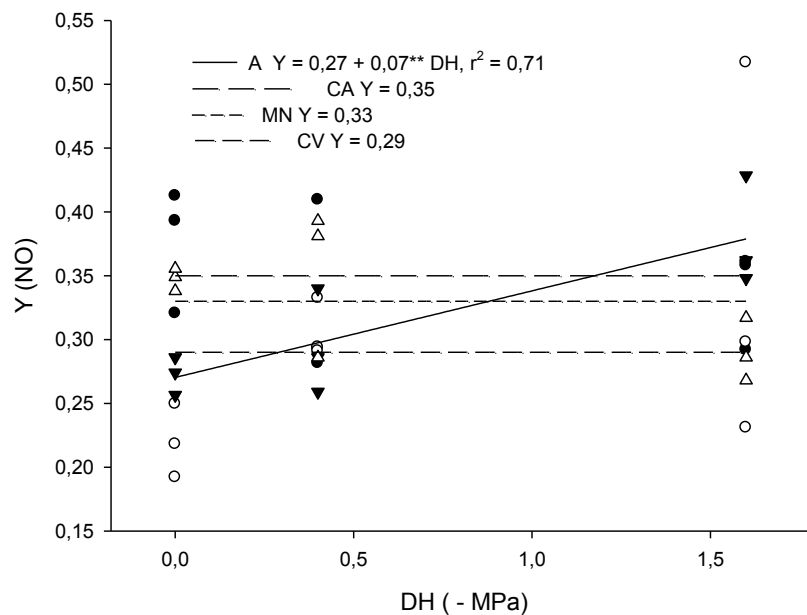
Em relação ao efeito dos déficits hídricos sobre o Y(II) das cultivares, não houve ajuste a equações de regressão para Catuaí Vermelho, Catuaí Amarelo e Mundo Novo indicando que déficits hídricos não afetaram a resposta do rendimento quântico do fotossistema II nestas cultivares, pelo que a resposta foi definida pelos valores médios, com o maior valor médio para Catuaí Vermelho. Acauã se ajustou a uma equação linear com coeficiente angular negativo mostrando que foi a única cultivar que com aumento dos déficits hídricos teve reduções de Y (II), indicando ser uma cultivar sensível a condições de déficit hídrico ao reduzir a utilização da energia luminosa para fotossíntese (Figura 5). De forma similar o Y (NPQ) das cultivares não mostrou ajuste a equações de regressão indicando que os déficits hídricos não afetaram o padrão de resposta desta variável e, que Catuaí Vermelho apresentou o maior valor (Figura 6). Para o Y (NO) Acauã foi a única cultivar que apresentou ajuste a uma equação de regressão linear com coeficiente angular positivo (Figura 7), mostrando ser a única cultivar que respondeu aumentando a dissipação de energia por esta via na medida que aumentou os déficits hídricos, levando a quedas no Y(II), portanto, é uma variedade que se protege do excesso de energia de excitação com maior dissipação na forma de calor e fluorescência, o que conseqüentemente conduziu a queda da fotossíntese.



**Figura 5.** Equações ajustadas do rendimento quântico do PS II (YII) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5% de significância.



**Figura 6.** Equações ajustadas do rendimento quântico da dissipação regulada de energia não fotoquímica Y (NPQ) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) em dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5% de significância.



**Figura 7.** Equações ajustadas do rendimento quântico da dissipação não regulada na forma de calor e fluorescência Y (NO) de cultivares de café em função do déficit hídrico (DH) na dose baixa de nitrogênio. \*\*1%, \* 5% de significância.

#### 4 CONCLUSÕES

- Houve redução das trocas gasosas, especificamente a taxa fotossintética em todas as cultivares quando cultivadas em concentrações baixas de nitrogênio.
- Reduções da taxa fotossintética das cultivares, esteve associada a um efeito sinérgico de limitações estomáticas e bioquímicas.
- Déficit hídrico não afetou os parâmetros da fluorescência da clorofila sugerindo que a eficiência fotoquímica do fotossistema II foi pouco afetada por este tipo de déficit.
- Em condições de adequada nutrição nitrogenada para a cultura do cafeeiro, a cultivar Catuaí Vermelho apresentou menor redução da eficiência de carboxilação, taxa fotossintética e maior eficiência de uso da água quando submetida a condições de déficit hídrico baixo/moderado.
- Em condições de baixo suprimento de nitrogênio a cultivar Acauã apresentou menor redução da taxa fotossintética, eficiência de carboxilação e eficiência no uso da água quando submetida as condições dos déficits hídricos -0,4 e -1,6 MPa.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, N. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis In vivo. Annual review of plant biology. 59:89-113, 2008.
- BAKER, N.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. Journal of Experimental Botany, Oxford, v.55, p.1607-1621, 2004.
- BJORKMAN O, DEMMIG, B. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. Planta 170:489–504, 1987.
- CARELLI, M.; FAHL, J.; RAMALHO, J. Aspects of nitrogen metabolism in coffee plants. Braz. J. Plant Physiol., 18(1):9-21, 2006.
- CHAVES, A. et al. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. Trees (2008) 22:351–361
- CORNIC, G.; GHASHGHAIE, J.; GENTY, B.; BRIANTAIS, J. Leaf photosynthesis is resistant to a mild drought stress. Photosynthetica, 27, 295-309. 1992.
- DAMATTA, F.; MAESTRI, M.; BARROS, R. Photosynthetic performance of two coffee species under drought. Photosynthetica 34 (2) 257-262. 1997.
- DAMATTA, F.; LOOS, R.; SILVA, E.; LOUREIRO, M.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. Trees. 16:555–558. 2002.
- DAMATTA, F.; LOOS, R.; SILVA, E.; LOUREIRO, M. Limitations to photosynthesis in *Coffea canephora* as a result of nitrogen and water availability. J. Plant Physiol. 159. 975–981. 2002.
- DAMATTA, F. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. Braz. J. Plant Physiol., 16(1):1-6, 2004.
- EARL H., DAVIS R.F. Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize, Agron. J. 95, 688–696. 2003.
- EVANS J.R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C<sub>3</sub> plants, Oecologia 78, 9–19. 1989.
- FAROOQ, M. et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy Sustainable Development. 29. 185–212. 2009.
- FLEXAS, J., MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C<sub>3</sub> plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. Ann. Bot. 89, 183–189. 2002.
- GRASSI, G., MAGNANI, F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. Plant Cell Environ. 28, 834–849. 2005.

- GUO, Y.; CAO, K. Effect of night chilling of photosynthesis of two coffee species grown under different irradiances. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 79 (5) 713–716. 2004.
- HAUPT-HERTING S., FOCK H.P. 2000. Exchange of oxygen and its role in energy dissipation during drought stress in tomato plants. *Physiol. Plant.*, 110, 489-495.
- HUNER, N. et al. Energy Sensing and Photostasis in Photoautotrophs. *Sensing, Signaling and Cell Adaptation*. (17) 243-255. 2002.
- JONGDEE, B.; FUKAI, S.; COOPER, M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice. *Field Crops Res.*, 76:153-163, 2002.
- KRAMER P.J.; BOYER J.S. *Water relations of plants and soils*. San Diego: Academic Press. 1995.
- KRAUSE G.H., WEIS E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 42, 313-349.
- MAXWELL, K.; JOHNSON, G. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal Experimental Botanic*. (345) 659-668. 2000.
- MEHER, P.; SHIVAKRISHNA, K.; ASHOK, D.; RAO, M. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*. (30) 1-4. 2017.
- NI, B.; PALLARDY, S.G. Stomatal and non stomatal limitation to net photosynthesis in seedlings of woody angiosperms. *Plant Physiology*, v.99, 1992. p.1502-1508.
- NOGUÉS S., BAKER N.R. 2000. Effects of drought on photosynthesis in Mediterranean plants grown under enhanced UV-B radiation. *J. Exp. Bot.*, 51, 1309-1317.
- NUNES, M.; RAMALHO, J. DIAS, M. Effect of nitrogen supply on the photosynthetic performance of leaves from coffee plants exposed to bright light, *J. Exp. Bot.* 262, 893–899. 1993.
- LAWLOR, D.W. Limitation to photosynthesis in water stressed leaves: stomata versus metabolism and the role of ATP. *Ann. Bot.* 89, 871–885. 2002.
- LAWLOR, D.W., CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficit in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25, 275–294. 2002.
- LEIDI, E.O., LOPEZ, J.M., LOPEZ, M., GUTIERREZ, J.C. Searching for tolerance to water stress in cotton genotypes: photosynthesis, stomatal conductance and transpiration. *Photosynthetica*, 1993. 28:383-390.
- LIMA, A. et al. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. *Environmental and Experimental Botany* (2002) 47: 239–247.



- LU, C.; ZHANG, J. Photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll fluorescence and photoinhibition as affected by nitrogen deficiency in maize plants. *Plant Science* 151, 135–143. 2000.
- POMPELLI, M. et al. Photosynthesis and photoprotection in coffee leaves is affected by nitrogen and light availabilities in winter conditions. *Journal of Plant Physiology* 167 (2010) 1052–1060
- PRAXEDES, S. et al. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. *kouillou*) leaves *Environmental and Experimental Botany* 56 (2006) 263–273
- RASCHER, U.; LIEBIG, M.; LÜTTGE, U. Evaluation of instant light-responses curves of chlorophyll parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field. *Plant Cell and Environment*, Oxford, v. 23, n. 12, p. 1397-1405, 2000.
- SILVA, E.; DAMATTA, F.; DUCATTI, C, REGAZZI, A.; BARROS, R. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis in Arabica coffee trees. *Fields Crops Research*. (89) 349-357, 2004.
- TEZARA W., MITCHELL V.J., DRISCOLL S D., LAWLOR D.W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature*, 1999. 401, 914-917.
- SHANGGUAN, Z.; SHAO, M.; DYCKMANS, J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. *Environmental and Experimental Botany*. (44). 141–149, 2000.
- VERHOEVEN, A.; DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. Enhanced employment of the xanthophyll cycle and thermal energy dissipation in spinach exposed to high light and N stress, *Plant Physiology*. 113, 817–824. 1997.
- VILLELA, F.; FILHO, L.; Sequeira, E. Tabela de déficit osmótico em função da concentração de polietileno glicol 6000 e da temperatura. *Pesquisa agropecuária brasileira*. 26 (11/12), p. 1957-1968. 1991.
- WU, F.; BAO, W.; LI, F.; WU, N. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. *Environmental and Experimental Botany* (63). 248–255. 2008.
- ZHOU, Y.; LAM, H.M.; ZHANG, J. Inhibition of photosynthesis and energy dissipation induced by water and high light stresses in rice. *J. Exp. Bot.* 58, 1207–1217. 2007.
- ZLATEV, Z.; LIDON, F. Effects of water déficit on plant growth, water relations and photosynthesis, *Reserch Gate*. 2005.

## **CAPÍTULO 3**

### **PARÂMETROS CINÉTICOS DE ABSORÇÃO DE NITRATO NAS FASES DE DESENVOLVIMENTO DOS FRUTOS DO CAFEIRO EM CONDIÇÕES DE CAMPO**

## RESUMO

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2019. **Parâmetros cinéticos de absorção de nitrato nas fases de desenvolvimento dos frutos do cafeeiro em condições de campo.** Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Kacilda Naomi Kuki.

Nitrogênio é o nutriente mais demandado pela maioria das culturas incluído o cafeeiro, mas sua eficiência agrônômica de uso é baixa, em torno de 50% devido a sua complexa dinâmica no solo, assim como aspectos constitutivos da espécie relacionados ao metabolismo do nitrogênio que conduzem a baixa eficiência de utilização, sendo um indicativo as consideráveis doses de adubos nitrogenados para atingir um determinado patamar de produção. Nesse sentido conhecer os aspectos da absorção de nitrogênio relacionados com os parâmetros cinéticos nas fases fenológicas pode contribuir a uma aproximação mais detalhada da dinâmica de aquisição deste nutriente. O objetivo deste trabalho foi determinar a influência das fases fenológicas relacionadas ao desenvolvimento do fruto sobre os parâmetros cinéticos de absorção de nitrato em cafeeiro da cultivar Catuaí Vermelho em condições de campo. O experimento foi conduzido em talhão com árvores de 5 anos de idade. Utilizou-se estatística descritiva e medidas associativas para apresentar os resultados. As fases fenológicas consideradas foram chumbinho (Ch), expansão rápida (ER), granação (G) e maturação (M). Para determinar os parâmetros cinéticos de absorção foi montado ensaio de exaustão de nitrato, utilizando solução nutritiva feita com  $\text{KNO}_3$  a concentração de  $90 \mu\text{mol L}^{-1}$ . Foram selecionadas raízes na camada de 0 a 10 cm fazendo-se trincheiras e isolando-se raízes laterais. Em torno dessas raízes laterais instalaram-se “câmaras de crescimento” usando vermiculita como substrato e tecido não tecido (TNT) para delimitar a câmara, isto é, bolsões de crescimento de raízes finas. Passados aproximadamente um mês foi retirada a câmara de crescimento para acessar as raízes finas. Foi utilizada sacola coletora de urina para acomodar as raízes em contato com a solução de exaustão. Após o período de estabilização, cada hora foi coleta uma amostra da solução de exaustão por um período de 7 horas. Uma vez determinadas as concentrações de nitrato das amostras, e com os dados da matéria fresca das raízes finas e volumes iniciais e finais de solução foram estimados os valores de  $V_{\text{max}}$  e  $K_m$  utilizando-se o método da aproximação gráfico matemática. Os valores médios de  $V_{\text{max}}$  variaram entre  $0,14$  a  $0,72 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$  e para  $K_m$  entre  $6,47$  a  $50,31 \mu\text{mol L}^{-1}$ . Os valores de  $V_{\text{max}}$  foram maiores na fase de (Ch) e (M). A taxa de absorção de nitrato foi maior na fase de (ER) até  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ , com maior taxa de absorção na fase de (M) acima dessa concentração e, com menor taxa na fase de (G).  $V_{\text{max}}$  só na fase

de (ER) teve correlação positiva com produção de frutos. Km mostrou menor valor na fase de (ER) impactando positivamente taxa de absorção, com maiores valores na fase de (G) e ainda mais na (M).

Palavras-chave: Vmax. Km. Fases fenológicas. Taxa de absorção.

## ABSTRACT

BOHÓRQUEZ, César Avellaneda. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2019. **Kinetics parameters for nitrate absorption on phases of coffee fruit development under field conditions.** Advisor: Hermínia Emília Prieto Martinez. Co-advisors: Paulo Roberto Cecon and Kacilda Naomi Kuki.

Nitrogen is the most demanded by the majority of cultivations, included coffee, but its agronomic efficiency of use is low, around 50% because of its complex dynamic on soil, as well as constitutive aspects of the species related to the nitrogen metabolism that conduce to low utilization efficiency, being an indicator of the significant doses of nitrogen fertilizers, used to approach a determined production level. In that sense, knowing the nitrogen absorption aspects related to the kinetic parameters in the phenological phases could contribute to a more detailed approximation of this nutrient. The objective of this research is to determine the influence of the phenological phases related to fruit development regarding the kinetic parameters of nitrate absorption on coffee from the Catuaí Vermelho cultivar under field conditions. The experiment was realized in a field with 5-year-old trees. Descriptive statistics and associative measures were used to present the outcomes. The phenological phases considered were: pin head fruit (PH), rapid expansion (RE), granation (G), and maturation. A nitrate exhaustion test was set in order to determine the absorption kinetic parameters, using a nutritive solution made with  $\text{KNO}_3$  to the  $90 \mu\text{mol L}^{-1}$  concentration. Lateral roots were selected in the soil layer, 0 to 10 cm, generating trenches and isolating them, around them were installed growth chambers using vermiculite as substrate and nonwoven fabric in order to delimit the chamber, in a way that benefits the growth of the thin roots. Approximately one month later, the chamber was pulled out, allowing the thin roots. A drainage bag to collect urine was used to accommodate the roots and allow contact with the exhaustion solution. After the stabilization period, a sample of the exhaustion solution was collected every hour, for a period of 7 hours. Once determined the nitrate concentrations in the samples, with the data of fresh-mass of the thin roots and the initial and final solution volume, the  $V_{\text{max}}$  and  $K_m$  values were estimated by the graphic-mathematical method. The mean values varied between 0,14 to 0,72  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$  and between 6,47 a 50,31  $\mu\text{mol L}^{-1}$  on  $K_m$ . The  $V_{\text{max}}$  values were larger in the phase of (PH) and (M). The nitrogen absorption rate in the phase of (RE) up to  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ , with the highest absorption rate in the phase of (M) over that concentration and a lower rate in the phase of (G). The  $V_{\text{max}}$  just in the phase of (RE) had a positive correlation with fruit production. The  $K_m$

showed a lower value in the phase of (RE) positively affecting the absorption rate, with higher values in the phase of (G) and even more in the phase of (M).

Keywords:  $V_{max}$ .  $K_m$ . Phenological phases. Absorption rate.

## 1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um nutriente de relevante importância no crescimento e desenvolvimento vegetal por ser constituinte de vários componentes do aparelho fotossintético e enzimas relacionadas com a fixação de CO<sub>2</sub>, o que determina a produção de biomassa, razão pela qual é considerado um fator chave na produtividade das culturas. Dentre as formas de N disponíveis orgânicas (ureia e aminoácidos) quanto inorgânicas (nitrato e amônio), as plantas absorvem nitrato em maior proporção que o amônio em parte por sua maior mobilidade no solo. Em solos cultivados, o nitrato pode variar na faixa de 0,1 a 5,0 milimolar (mM) (Bose e Srivastava, 2001). No caso do cafeeiro nitrato é a forma mais absorvida pelas raízes, mas também pode ocorrer a absorção de amônio (Reis, 2007; Miller et al., 2007). Por outra parte, a eficiência agrônômica da aplicação de adubos nitrogenados é baixa com recuperação de 40 a 50 % da dose aplicada, ocasionada por perdas associadas a lixiviação e volatilização, que podem ser potencialmente contaminantes do ambiente principalmente afetando corpos de água via lixiviação.

Plantas tem desenvolvido mecanismos de absorção de modo a ajustar-se as flutuações nas concentrações e diversas formas dos nutrientes, para o caso do nitrogênio sujeitas a uma complexa dinâmica biogeoquímica que é influenciada pelas características químicas, físicas e microbiológicas do solo. Absorção de nitrato e amônio pelas raízes é mediada por proteínas transportadoras nas membranas plasmáticas, que apresentam afinidades diferentes tanto para nitrato quanto para amônio. Para nitrato, as plantas desenvolveram um refinado sistema de absorção que inclui proteínas transportadoras de alta afinidade (HATS) que operam a baixas concentrações externas (<0.5 mM) de nitrato. E proteínas de baixa afinidade operando em altas concentrações (> 0.5 mM), garantindo desta forma a absorção de nitrato em função da disponibilidade do substrato (Marschner, 2012; Wang et al., 2012).

A quantificação das frações dos nutrientes e sua disponibilidade especialmente para o caso do nitrogênio, tem limitado as recomendações baseadas na estimativa das formas disponíveis através das análises químicas de solo, devido a sua dinâmica no solo principalmente nas camadas superficiais, o que tem inviabilizado interpretações confiáveis que permitam prever sua efetiva disponibilidade para as plantas. Já a avaliação de aspectos fisiológicos relacionados com os parâmetros cinéticos da absorção de nutrientes pode fornecer informações relacionadas com a capacidade da planta para aquisição de nutrientes dada uma determinada concentração

no substrato, o que implica que a planta torna-se um indicador sensível das quantidades de adubos aplicar para satisfazer as demandas nutricionais, enfoque que pode contribuir para aumentar a eficiência agronômica do uso de adubos.

Tradicionalmente a estimação dos parâmetros cinéticos tem sido feita em sistemas hidropônicos devido à facilidade para acessar as raízes e ao substrato e, à obtenção de amostras da solução de exaustão sem maiores complicações metodológicas. No entanto, poucas referências se encontram sobre trabalhos conduzidos em condições de campo como uma aproximação a estimativas mais realísticas. Sousa (2015) estimou os parâmetros cinéticos em mudas de cafeeiro de 9,5 meses submetidas a tratamentos de déficit hídrico, em casa de vegetação, encontrando que os parâmetros  $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$  foram reduzidos pela imposição do déficit hídrico com respostas diferenciais entre as cultivares avaliadas. Pinto (2016) em casa de vegetação, utilizou árvores de 5 anos e também estimou os parâmetros cinéticos de cafeeiros submetidos a déficit hídrico em diferentes fases fenológicas do desenvolvimento do fruto, encontrando que o déficit hídrico reduziu os valores  $V_{max}$ , aumentou os valores  $C_{min}$  e não afetou os valores  $K_m$ . Esse autor verificou que os valores de  $K_m$  foram maiores na fase de primeira expansão rápida e intermediários nas fases prefloração e floração-chumbinho e menores em enchimento do grão. Já  $V_{max}$  foi menor em enchimento do grão em relação às outras fases.

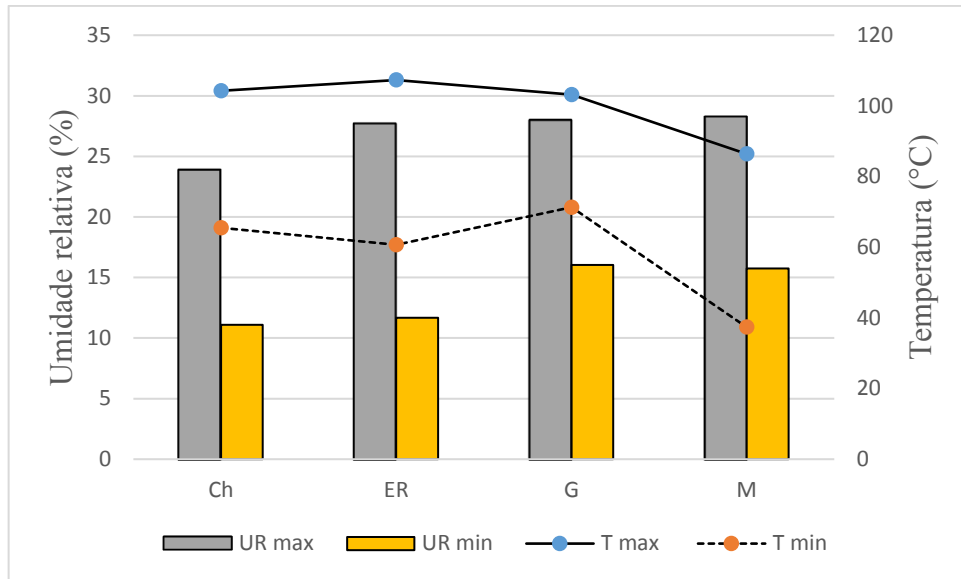
Objetivo deste trabalho foi estimar os parâmetros cinéticos de absorção de nitrato em árvores adultos em diferentes fases fenológicas do desenvolvimento do fruto, mediante metodologia desenvolvida para condições de campo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Condições experimentais**

O experimento foi conduzido no Vale de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa (latitude 20° 45' 58" S, longitude 42° 52' 06" W e altitude 676 m). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 1999). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, quente e úmido, caracterizado por inverno seco e frio com temperaturas mínimas inferiores a 10 °C. Na figura 1 se mostram as condições do tempo nos dias em que foram realizadas as avaliações.





**Figura 1.** Dados de umidade relativa e temperatura, durante os dias de avaliação.

A área de estudo concentrou-se no talhão de café da cultivar Catuai Vermelho IAC 99 com árvores de 5 anos de idade, plantadas em espaçamento de 2 x 1 m. em sistema de sequeiro. As plantas foram manejadas de acordo com as práticas usuais para a cultura e receberam calagem e adubação de acordo com Ribeiro et al, (1999) desde a implantação da lavoura. Durante a fase experimental as plantas estavam livres de competição com plantas daninhas, sendo seu controle feito mediante capina mecânica. Controle de pragas e doenças também foi realizado.

Antes do início do experimento foram coletadas 20 amostras simples de solo na camada (0-20 cm) para formar uma amostra composta. Amostragem que foi feita em todo o talhão e sobre a área de projeção da copa das plantas, com caminhamento em zigue zague. As amostras foram secas ao ar (TFSA) e passadas em peneira de 2 mm. Na TFSA foi realizada análise química, determinando-se pH em água, teores de P, K, Zn, Cu, Fe, Ca, Mn, acidez trocável, acidez potencial, C orgânico, B, P-remanescente e S (Tabela 2).

**Tabela 2.** Caracterização química do solo da área experimental

Características químicas	Camada (0-20 cm)
Ph	4,44
MO (dag/kg)	1,57
P (mg/dm <sup>3</sup> )	3,1
K (mg/dm <sup>3</sup> )	102
Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,35
Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,27
Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	2,30
H+Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	17,2
t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	4,18
T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	19,08
V (%)	9,9
m (%)	55
Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	16,09
Fe (mg/dm <sup>3</sup> )	484,3
Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	3,1
Zn (mg/dm <sup>3</sup> )	3,30
P rem (mg/L)	19,8

(1) pH em água, relação 1:2,5. (2) P, K e Zn: extrator Mehlich-1. (3) Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. (4)H+AL: extrator Ca(OAc)2 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 7,0. (5) Soma de Bases Trocáveis. (6) P-rem: fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000). (7) MO (matéria orgânica): C. org. x 1,724 (Walkley-Black).

A Necessidade de Calagem (NC) foi determinada pelo método de saturação por bases para a correção da acidez do solo, como sugerido por Ribeiro et al (1999), visando elevar os níveis de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no solo. Para aproximar pH entre 5,6 a 6,7, a dose calculada foi de 1,65 t ha<sup>-1</sup> sendo aplicado 330 g por planta, utilizando-se calcário dolomítico de composição (CaO 30% e MgO 10%) e poder de neutralização de 77%. Os adubos aplicados foram Sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio em doses de 100, 35 e 45 g/planta, respectivamente. A adubação foi feita na projeção da copa três vezes e simultaneamente foi feita irrigação.

## 2.2 Ensaio de exaustão de nitrato

No final do ciclo de produção anterior foram selecionadas ao acaso e marcadas 32 árvores, por homogeneidade de porte e altura para realização de quatro ensaios de exaustão nas fases fenológicas de chumbinho (Ch), primeira expansão rápida (ER), granação (G) e maturação

(M). Cerca de um mês antes de cada amostragem, foram escavadas trincheiras na base de oito das 32 árvores previamente selecionadas, visando encontrar raízes laterais na camada de 0-10 cm de profundidade. Uma vez selecionada a raiz lateral, instalou-se ao seu redor uma câmara de crescimento que consistiu de um cilindro de aproximadamente 8 cm de diâmetro feito de tecido não tecido (TNT) preenchido com vermiculita como substrato.

Um retângulo de TNT foi colocado embaixo da raiz selecionada, em seguida acomodou-se a vermiculita sobre o tecido e envolveu-se a raiz num cilindro que foi fechado mediante costura com fio plástico. Posteriormente a trincheira foi enchida com a terra escavada e a câmara de crescimento permaneceu sob a superfície do solo. No momento da amostragem removeu-se a terra em torno da câmara de crescimento para ter acesso às novas raízes que aí se desenvolveram.

A florada principal do cafeeiro ocorreu em 09/10/2017 e as amostragens foram realizadas em 16/11/17, 10/12/17, 14/03/18 e 11/05/18 para as fases Ch, ER, G e M respectivamente. No dia da amostragem, uma vez aberta a câmara de crescimento, retirada a vermiculita e lavadas as raízes com água deionizada sobre uma bandeja, foram utilizadas bolsas coletoras de urina para colocar as raízes em contato com a solução de exaustão, sendo estas preenchidas com 1 L de solução com concentração de  $90 \mu\text{mol L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ , feita com  $\text{KNO}_3$ . Posteriormente foi instalado um arejador portátil dentro da bolsa para garantir a oxigenação e homogeneização da solução durante o período de exaustão. A tomada de amostras deu-se por uma torneira instalada na parte inferior da bolsa. Aguardou-se 90 minutos para que o processo de absorção atingisse o estado estável. Após este período, cada hora foi coletado um volume aproximado de 2 mL da solução de exaustão durante um período de 7 horas. As amostras foram recolhidas em ependorf previamente pesado e imediatamente armazenadas em caixa com gelo. No laboratório realizou-se nova pesagem dos ependorfs para determinar o volume exato de cada amostra. As amostras coletadas foram armazenadas em geladeira para posterior determinação da concentração de nitrato. No final do período de exaustão foi medido o volume final da solução visando determinar o volume transpirado. Para determinar a matéria fresca de raízes finas ( $\varnothing \leq 2,0 \text{ mm}$ ), estas foram cortadas da planta, lavadas, separadas das raízes grossas e em seguida pesadas em balança analítica.

As concentrações de nitrato na solução de exaustão foram determinadas pelo método colorimétrico descrito por Doane e Horwath (2003), que quantifica nitrato, através da adição de um único reagente à amostra, produzindo uma coloração rósea. Após o desenvolvimento da

cor (aproximadamente 8 h) as amostras foram transferidas para placas de microtitulação com 96 poços, procedeu-se a leitura em espectrofotômetro de absorção molecular Biochrom EZ 400 READ, no comprimento de onda de 540 nm.

### **2.3 Cálculo dos parâmetros cinéticos**

Foi criada uma planilha para organizar os dados relacionados ao volume da solução no momento da coleta da amostra, considerando-se o volume variável das amostras, as concentrações de nitrato nas amostras, o volume da água transpirada (sendo considerada a transpiração constante ao longo do período de exaustão), volume da solução em cada momento de amostragem e, a matéria fresca das raízes finas das plantas. Utilizou-se a metodologia proposta por Claassen e Barber (1974) que relaciona a quantidade do nutriente (obtida do produto da concentração pelo volume da solução em cada amostragem) com o tempo de amostragem, foi criada uma função quantidade do nutriente x tempo, base para estimar os valores dos parâmetros cinéticos. Para calcular  $V_{max}$  e  $K_m$  foi utilizada a metodologia gráfico matemática desenvolvida por Ruiz (1985) que divide mencionada função em um segmento linear para o cálculo de  $V_{max}$  e, outro segmento assintótico para o  $K_m$ .

### **2.4 Estimação da produção de raízes finas e produção de frutos**

Foram coletadas amostras de solo de volume conhecido na camada de 0-30 cm com ajuda de trado amostrador em três pontos/planta ao interior da área de projeção da copa das árvores, visando estimar a quantidade de raízes finas nesse volume de solo. As amostras foram tiradas do amostrador, colocadas em bandejas para catação das raízes e finalmente pesadas. O peso obtido no volume de solo amostrado foi extrapolado ao volume do cilindro formado pelo diâmetro médio da copa até a profundidade de 30 cm. Também foram colhidos os frutos de cada planta e posteriormente pesados para determinar sua matéria fresca.

### **2.5 Análise estatística**

Os dados obtidos dos parâmetros cinéticos foram submetidos a análise descritiva através da aplicação do parâmetro média  $\pm$  desvio padrão. Adicionalmente, foram feitas correlações por meio do coeficiente de Pearson entre os parâmetros cinéticos  $V_{max}$ ,  $K_m$ , quantidade de raízes e produção de frutos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Parâmetros cinéticos de absorção de nitrato

Os parâmetros cinéticos mostraram variações com valores de  $V_{max}$  entre 0,143 a 0,724  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$  e para  $K_m$  entre 6,476 a 50,316  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , mudando também em função da fase fenológica (Tabela 1). Pinto (2016) encontrou em cafeeiros de 60 meses crescendo em casa de vegetação valores de  $V_{max}$  de 0,34 a 0,83  $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$  mostrando estar em uma faixa similar aos observados neste trabalho. Para o  $K_m$  o mesmo autor encontrou valores entre 120,48 a 264,98  $\mu\text{mol L}^{-1}$  mostrando ser bastante maiores aos observados neste trabalho. Essas diferenças poderiam atribuir-se às condições experimentais relacionadas principalmente com a concentração do nutriente na solução de exaustão, quantidade de raízes e a condições ambientais que promoveram maior transpiração gerando maior influxo de nitrato.

**Tabela 1.** Valores dos parâmetros cinéticos de absorção de nitrato: velocidade máxima de absorção ( $V_{max}$ ) e constante de Michaelis-Menten ( $K_m$ ) nas fases fenológicas avaliadas.

Fase	$V_{max}$ $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$K_m$ $\mu\text{mol L}^{-1}$
Chumbinho	$0,493 \pm 0,372$	-----
Expansão rápida	$0,268 \pm 0,134$	$6,476 \pm 1,003$
Granação	$0,143 \pm 0,037$	$15,285 \pm 1,517$
Maturação	$0,724 \pm 0,183$	$50,316 \pm 3,874$

Durante o período de avaliação os parâmetros cinéticos mostraram variações em função das fases fenológicas, na maturação a  $V_{max}$  mostrou o maior valor seguido pela fase de chumbinho, expansão rápida e com o menor valor na fase de granação. Epstein e Bloom (2006) menciona que  $V_{max}$  é considerado como o produto do número de sítios de absorção (carregadores) por unidade de raiz e sua velocidade de funcionamento, entretanto Li et al (2013) menciona que  $V_{max}$  se refere a máxima capacidade do sistema radicular para absorver uma determinada forma de nutriente quando todos os carregadores se encontram saturados indicando a taxa máxima de transporte. Portanto, nas fases de chumbinho e maturação aumentou a capacidade máxima de absorção de nitrato seja por aumento da concentração dos carregadores ou por aumento da sua velocidade de operação, o que estaria associado a maiores demandas de nitrato nestas fases.

Neto et al (2014) encontraram que os teores foliares de  $\text{NO}_3^-$  aumentaram da preantese até a fase de chumbinho com posterior queda na fase de granação, atribuída a remobilização para

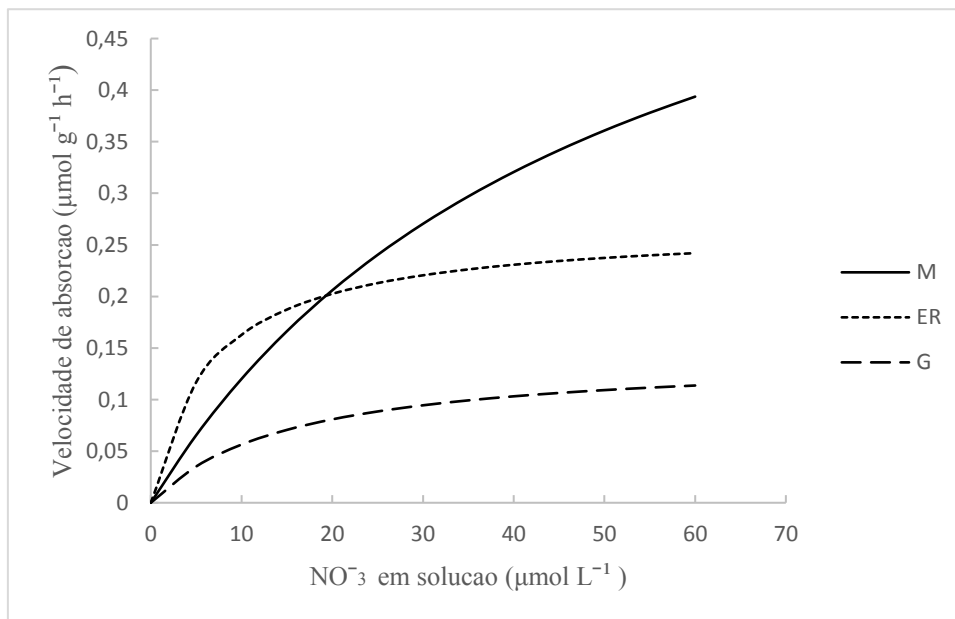
sustentar o desenvolvimento do fruto. Novamente houve aumento no início da maturação do fruto. Em relação a atividade da Nitrato Redutase esses autores encontraram que na fase de preantese houve alta atividade, similar ao encontrado por Carelli et al (1989) onde atividade da Nitrato Redutase foi elevada previamente à antese e ao final do desenvolvimento do fruto, indicando que atividade da Nitrato Redutase mostrou maiores valores nos períodos de intenso metabolismo e demanda de nutrientes pelos drenos flores e frutos, e que enzimas do metabolismo do nitrogênio e conteúdo de nitrato foram diretamente relacionados ao ciclo fenológico do café. Carvajal et al (1969) e Reis et al (2009) encontraram em café adulto maiores taxas de absorção de nitrato prévio à antese e no início da maturação do fruto. Resultados que coincidem com os encontrados neste trabalho assumindo que de antese até chumbinho a absorção fosse similar.

Os maiores valores de  $V_{max}$  na fase de chumbinho e maturação neste trabalho mostraram uma resposta coerente com os padrões de absorção e atividade da Nitrato redutase encontrada nesses trabalhos, sugerindo que  $V_{max}$  respondeu às maiores demandas de nutrientes nessas fases levando a maior absorção de nitrato. E que os mecanismos que operam o processo de absorção conseguem modular este parâmetro em função das demandas diferenciais de nutrientes sinalizadas pelas fases fenológicas. Adicionalmente Prezotti e Braganca (2013) encontraram que o teor de nitrogênio tanto na folha como na raiz diminuíram em função do tempo após floração, indicando que durante o período de desenvolvimento do fruto ocorre remobilização do nitrogênio, o que poderia promover maior absorção de nitrogênio nessas fases contribuindo a suprir as elevadas demandas.

Fernandes e Souza (2006) mencionam que o controle da absorção de nitrogênio tem sido relacionado com o status do nitrogênio na planta, mostrando que altos teores das formas reduzidas do nitrogênio ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  e aminoácidos livres) conduzem a diminuição da absorção, mostrando um controle via retroalimentação, indicando que os teores de compostos reduzidos na planta estão relacionados com a dinâmica de absorção do nitrato. O trabalho de Ivashikina e Sokolov (1997) relata que o fornecimento de compostos nitrogenados mais reduzidos (amônio e o aminoácido glutamina) diminuiu a atividade da Nitrato redutase e aumentou os valores de  $K_m$  para nitrato. Dessa forma o status dos compostos nitrogenados reduzidos na planta podem contribuir na regulação dos parâmetros cinéticos de absorção do nitrato.

Os valores do parâmetro  $K_m$  foram aumentando cronologicamente em função das fases fenológicas, com menores valores no estágio de expansão rápida e maiores na maturação. O  $K_m$  é a concentração da solução em que se atinge a metade da  $V_{max}$  e indica a afinidade dos carregadores por uma determinada forma do nutriente, assim menores valores de  $K_m$  representam maior a afinidade dos carregadores pelo nutriente para sua entrada na raiz. Esses resultados mostram que houve maior afinidade do carregador pelo nitrato na fase de expansão rápida, com reduções da afinidade na fase de granação e ainda mais na fase de maturação.

Para melhor interpretação desses dados foi utilizada a equação proposta por Michaelis - Menten que adaptada a cinética de absorção de nutrientes descreve a velocidade de absorção de um soluto em função da sua concentração externa, que de outra forma expressa a taxa de absorção do nutriente e, relaciona  $V_{max}$  com  $K_m$ . A absorção de nitrato pelas plantas mostrou a cinética de saturação como esperado na faixa de baixas concentrações externas (Figura 2). Na fase de expansão rápida (ER) a taxa de absorção até a concentração de  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  foi maior em relação as fases de granação (G) e maturação (M), sendo atingida com menores concentrações devido a seu menor valor de  $K_m$ , indicando que o processo de absorção de nitrato foi mais eficiente sob baixas concentrações. Acima de  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  a taxa de absorção foi maior na fase de maturação devido a seu maior valor de  $V_{max}$ , a pesar do seu maior valor de  $K_m$ , indicando que maior número de carregadores contribuiu com maior absorção compensando a menor afinidade dos carregadores pelo nitrato.



**Figura 2.** Absorção de nitrato por cafeeiros adultos ( $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) em três fases fenológicas M (maturação), ER (expansão rápida) e G (granação) em função da variação externa da concentração em solução ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ).

Na fase de granação (G) a taxa de absorção de nitrato foi a menor dentre as fases avaliadas, a qual foi influenciada em maior extensão pelo menor valor da  $V_{max}$ , indicando que nesta fase o número de carregadores ou sua velocidade de operação foi baixa (Figura 2). Contrário a estes resultados Pinto (2016) encontrou nessa fase a maior taxa de absorção de nitrato, o que poderia estar relacionado a uma forte ação dreno pelo enchimento do fruto. Esta diferença seria atribuída a uma maior carga de frutos nesse estudo, o que promoveria maior taxa de absorção em função dos baixos valores de  $K_m$  encontrados, mas a produção de frutos não foi avaliada.

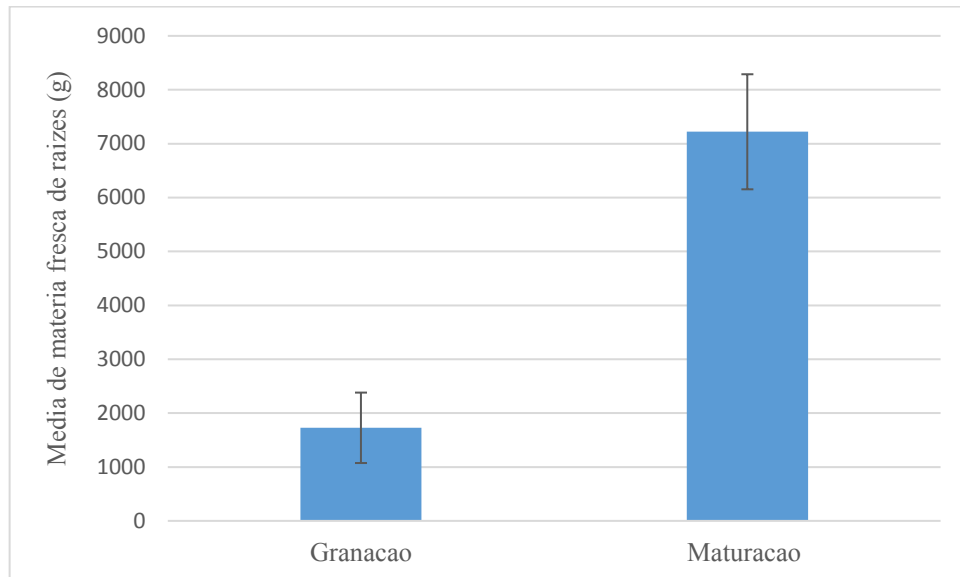
### **3.2 Produção de raízes finas e produção de frutos**

A absorção de nutrientes também é dependente das características morfológicas das raízes relacionadas a sua distribuição no perfil do solo, comprimento, diâmetro e área superficial. Considera-se que o maior comprimento do sistema radicular é indicativo de maior volume de solo explorado pelas raízes mostrando maior potencial de absorção de nutrientes, e que área superficial e comprimento são as características mais relevantes quanto a eficiência de absorção de nutrientes (Zonta et al. 2006).

A produção de matéria fresca de raízes finas pelas árvores mostrou que na fase de granação houve em média uma quantidade quase 7 vezes menor em relação a fase de maturação, o que poderia estar associado a morte de raízes em função das altas demandas por carboidratos e nutrientes para enchimento do grão, consequência da sua forte atividade dreno (Figura 3). Mengel e Barber (1974) mencionaram que o desenvolvimento do fruto pode afetar o crescimento radicular, uma vez que após a polinização houve diminuição na densidade de raízes no milho na camada superficial do solo, Nutman (1933) encontrou que uma forte carga de frutos no cafeeiro reduziu o suprimento de carboidratos as raízes severamente conduzindo a sua morte. A maior quantidade de raízes finas na fase de maturação poderia indicar uma recuperação da produção de raízes para contribuir com as demandas nutricionais nessa fase, ou alternativamente, para suportar o crescimento da fase seguinte. Nesse sentido DaMatta et al. (1999) mencionaram que o efeito do fornecimento de nitrogênio durante o período frio sobre crescimento, conteúdo de nitrogênio e atividade foliar da NR foi observado no período de crescimento ativo seguinte e, que o conteúdo de compostos nitrogenados acumulados na raiz foram remobilizados para a parte aérea, o que suportaria maiores taxas de crescimento. Portanto essas relações funcionais, seriam acompanhadas por uma maior quantidade de raízes finas na



fase de maturação atuando como órgão de reserva de compostos nitrogenados durante o período frio para posteriormente ser utilizados no crescimento.



**Figura 3.** Matéria fresca de raízes finas nas fases de granação e maturação de árvores de café de 5 anos.

A produção média de frutos foi de 10,51 t/há. A produção de frutos (Prod) avaliada foi correlacionada com os valores de  $V_{max}$  e  $K_m$  obtidos na fase de expansão rápida, na fase de granação as correlações foram entre Prod- $V_{max}$ , Prod-MF raiz (matéria fresca de raiz) e  $V_{max}$ -MF raiz (Tabela 2). Na fase de expansão rápida houve uma correlação positiva entre  $V_{max}$  e Prod, verificando que  $V_{max}$  esteve associado com a produção de frutos indicando que nesta fase houve acúmulo de nitrogênio na planta e posteriormente via remobilização contribuiu com a produção de frutos.  $K_m$  por sua vez não teve correlação com a produção de frutos mostrando que foi um parâmetro que não teve associação com a produção de frutos.

**Tabela 2.** Matriz de correlação de Pearson entre produção de frutos, matéria fresca de raiz e parâmetros cinéticos.

	Expansão rápida		Granação			
	$V_{max}$	Prod	$V_{max}$	Prod	MF raiz	
$V_{max}$	1		$V_{max}$	1		
Prod	0,95	1	Prod	-0,34	1	
$K_m$		0,16	MF raiz	-0,57	0,57	1

Na fase de granação houve uma correlação negativa entre  $V_{max}$  e Prod possivelmente devido ao baixo valor de  $V_{max}$ , mostrando a menor capacidade de absorção de nitrogênio na granação por parte das plantas mais produtivas, sugerindo um feedback negativo para a absorção de N em plantas que tiveram absorção elevada na fase de expansão rápida. A correlação entre  $V_{max}$  e MF raiz também foi negativa indicando um possível efeito compensatório de aumento da velocidade de absorção na medida que diminui a quantidade de raízes o que parece coerente no sentido de manter uma taxa de absorção estável frente a diminuição do tecido de aquisição. Edwards e Barber (1976) observaram que diminuindo a proporção de raízes de milho expostas a solução nutritiva contendo nitrogênio aumentou sua taxa de absorção por unidade de raiz, sem compensar a absorção pela redução do comprimento radicular. A correlação entre MF raiz e Prod mostrou uma correlação positiva com baixo grau de associação indicando que maior quantidade de raízes nessa fase pouco influencia a produção de frutos, o que corrobora a hipótese de que a absorção de N durante a expansão rápida responde à demanda dos frutos em crescimento. De fato o valor  $V_{max}$  nesta fase mostrou-se o menor dentre as outras fases. Como observado  $V_{max}$  na fase de expansão rápida influenciou positivamente a produção de frutos indicando que a capacidade de absorção de nitrato nesta fase contribuiu ao normal desenvolvimento dos frutos em desenvolvimento, sobre tudo até a concentração de  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  através da maior taxa de absorção.

**Tabela 3.** Matriz de correlação de Pearson entre produção de frutos, matéria fresca de raiz e parâmetros cinéticos.

	Maturação			
	$V_{max}$	Prod	MF Raiz	Km
$V_{max}$	1			
Prod	-0,32	1		
MF Raiz	-0,28	-0,42	1	
Km		-0,14		1

Na fase de maturação a  $V_{max}$  teve uma correlação negativa com um baixo grau de associação com Prod apesar da maior  $V_{max}$  dentre as fases, indicando que  $V_{max}$  dessa fase, como esperado, influencia pouco a produção de frutos, da mesma forma que na fase anterior  $V_{max}$  teve uma correlação negativa com MF raiz indicando possivelmente que aumentos na quantidade de raízes tem um efeito regulatório sobre  $V_{max}$  como já mencionado. Contrário à resposta na fase de granação, MF raiz teve uma correlação negativa com Prod pelo que a maior quantidade de raízes nesta fase, também como o esperado, não tem influência sobre a produção

de frutos. Km teve correlação negativa com baixo grau de associação com Prod indicando que este parâmetro pouco se relaciona com a produção corrente de frutos. Fica evidente que os parâmetros cinéticos na fase de maturação não se relacionam com a produção de frutos apesar da maior taxa de absorção a partir de  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  indicando que as quantidades absorvidas podem ser alocadas em outros compartimentos da planta ou sujeitas a baixa eficiência de translocação pra o fruto, portanto, a maior taxa de absorção de nitrato nesta fase seria uma forma de estocar compostos nitrogenados para sustentar o crescimento na estação de crescimento seguinte.

#### 4 CONCLUSÕES

- As taxas de absorção de nitrato mostraram dependência das fases fenológicas, mostrando que os mecanismos de absorção podem modular os parâmetros cinéticos em função das demandas diferenciais em cada fase.
- As taxas de absorção foram maiores nas fases de chumbinho e maturação, sendo maior para maturação acima de  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ .
- Na fase de expansão rápida  $V_{\text{max}}$  mostrou correlação positiva com produção de frutos, portanto prévio a esta fase deve-se garantir adequada disponibilidade de nitrogênio no solo para não afetar a futura produção de frutos.
- Matéria fresca de raízes finas nas fases de granação e maturação teve uma baixa correlação com produção de frutos, mas foi evidenciado mediante correlação negativa que incrementos de matéria fresca de raízes levariam a reduzir  $V_{\text{max}}$  mostrando um efeito compensatório nas taxas de absorção nas fases de granação e maturação.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, V.; NOVAIS, R.; DIAS, L.; OLIVEIRA, J. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim. Informativo. SBCS, 25:27-32, 2000.

BOSE, B.; SRIVASTAVA, H. Absorption and accumulation of nitrate in plants: Influence environmental factors. Indian Journal of experimental Biology (39) 101-110. 2001.

CARELLI, M.; FAHL, J.I.; MAGALHÃES, C. Assimilação de nitrato durante desenvolvimento reprodutivo de plantas de café. Rev. bras. Ci. Solo 13:59-64, 1989.

CARVAJAL, J.F.; ACEVEDO, A.; LOPEZ, C.A. Nutrient uptake by the coffee tree during a yearly cycle. Turrialba 19:13-20. 1969.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A Method for Characterizing the Relation between Nutrient Concentration and Flux into Roots of Intact Plants. Plant physiology v. 54, n. 4, p. 564–568, 1974.

DAMATTA, F.; AMARAL, J.; RENA, A. Growth periodicity in trees of Coffea arabica L. in relation to nitrogen supply and nitrate reductase activity. Field Crops Research (60) 223-229. 1999.

DOANE, T.; HORWATH, W. Spectrophotometric determination of nitrate with a single reagent. Analytical Letters 36(12):2713-2722. 2003.

EDWARDS, J.; BARBER, S. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. Agronomy Journal, v.68, p.973-975, 1976.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2.ed. Londrina, Planta, 403p. 2006.

FERNANDES, M.; SOUSA, S. Absorção de nutrientes. In: Fernandes, M.S., ed. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.115-152.

IVASHIKINA, V.; SOKOLOV, A. Regulation of nitrate uptake and distribution in maize seedlings by nitrate, nitrite, ammonium and glutamate. Plant Science v. 123, n. 1-2, p. 29–37, 1997.

LI, S. X. X.; WANG, Z.-H. H.; STEWART, B. A. Responses of Crop Plants to Ammonium and Nitrate N. Advances in Agronomy. v. 118, p.205–397, 2013. Elsevier.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. San Diego: Academic, 651 p. 2012

MENGEL, D.; BARBER, S. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. Agronomy Journal, Madison, v.66, n.3, p.399-402, 1974.

MILLER, J.; FAN, X.; ORSEL, M.; SMITH, S.; WELLS, D. Nitrate transport and signalling. Journal Experimental Botany. 58: 2297–2306. 2007.

- NETO, A. P.; FAVARIN, J. L.; DOS REIS, A. R. Nitrogen metabolism in coffee plants in response to nitrogen supply by fertigation. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 27, n. 1, p. 41–50, 2014.
- NUTMAN, F.J. The root system of *Coffea arabica* L. I. Root systems in typical soils of British East Africa. *Empire Journal of Experimental Agriculture*, 1: 271-284, 1933.
- PINTO, W. Parâmetros cinéticos da absorção de nitrato e fotossíntese em cafeeiros adultos sob estresse hídrico. 2016. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Programa de Fitotecnia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.
- PREZOTTI, L.C.; BRAGANÇA, S.M. Acúmulo de massa seca, N, P e K em diferentes materiais genéticos de café Conilon. *Coffee Science*, Lavras, v. 8, n. 3, p. 284-294, jul./set. 2013.
- REIS, A.; FURLANI JÚNIOR, E.; HAGA, K. Atividade da redutase do nitrato em folhas de cafeeiro em função da adubação nitrogenada. *Acta. Sci. Agron.*, 29:269-276, 2007.
- REIS, A. et al. Nitrate Reductase and Glutamine Synthetase Activity in Coffee Leaves During Fruit. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 6, p. 315–324, 2009.
- RIBEIRO, A.; GUIMARÃES, G.; ALVAREZ V. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5.a. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 359 p. 1999.
- RUIZ, H. A. Estimativa dos Parâmetros Cinéticos  $K_m$  e  $V_{máx}$  por uma aproximação gráfico-matemática. *Revista Ceres* v. 32, n. 179, p. 79–84, 1985.
- SOUZA, B. P. Aspectos fisiológicos e moleculares da absorção e metabolismo do nitrogênio e do déficit hídrico em café arábica. 2015. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Centro de ciências agrárias. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2015.
- WANG, X. et al. Comprehensive Differential Proteomic Study of Nitrate Deprivation in *Arabidopsis* Reveals Complex Regulatory Networks of Plant Nitrogen Responses. *J. Proteome Res.*, 11, 2301–2315. 2012.
- ZONTA, E.; BRASIL, F.; GOI, S.; ROSA, M. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: Fernandes, M.S., ed. *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.7-52. 2006.