



RAFAEL ANTÔNIO ALMEIDA DIAS

**CRESCIMENTO INICIAL E NUTRIÇÃO DE CULTIVARES
DE CAFÉ ARÁBICA EM AMBIENTE CONTROLADO**

**LAVRAS - MG
2021**

RAFAEL ANTÔNIO ALMEIDA DIAS

**CRESCIMENTO INICIAL E NUTRIÇÃO DE CULTIVARES DE CAFÉ ARÁBICA
EM AMBIENTE CONTROLADO**

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

Prof. Dr. Rubens Jose Guimarães
Orientador

Dr. Cesar Elias Botelho
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

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

Dias, Rafael Antônio Almeida..

Crescimento inicial e nutrição de cultivares de café arábica em
ambiente controlado / Rafael Antônio Almeida Dias. – 2021.

68 p. : il.

Orientador: Rubens José Guimarães.

Coorientador: Cesar Elias Botelho.

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

Bibliografia.

1. *Coffea arabica*. 2. Cultivares. 3. Nutrição mineral. I. Rubens
José Guimarães. II. Botelho, Cesar Elias. III. Título.

RAFAEL ANTÔNIO ALMEIDA DIAS

**CRESCIMENTO INICIAL E NUTRIÇÃO DE CULTIVARES DE CAFÉ ARÁBICA
EM AMBIENTE CONTROLADO**

**INITIAL GROWTH AND NUTRITION OF ARABIC COFFEE CULTIVARS IN A
CONTROLLED ENVIRONMENT**

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

APROVADA em 26 de fevereiro de 2021.

Dr. César Elias Botelho	EPAMIG
Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva	UFLA
Dr. Tiago Teruel Rezende	UNIFENAS
Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho	EPAMIG

Prof. Dr. Rubens Jose Guimarães
Orientador

Dr. César Elias Botelho
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

A Deus,

Pela saúde e esperança de conseguir chegar até aqui.

AGRADEÇO

As minhas filhas Larissa e Mariana, que são minhas fontes de inspiração e que fazem querer melhorar a cada dia.

A minha mulher, Sheila, que sempre esteve ao meu lado me apoiando.

Aos meus pais, Elias e Venância, por sempre estarem ao meu lado e nunca medirem esforços para que esse momento acontecesse.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Rafaela, pela amizade e companheirismo.

A todos os meus amigos e familiares, que sempre me

Incentivaram e estiveram comigo nos momentos mais difíceis.

OFEREÇO

Ao cafeicultor brasileiro, razão deste estudo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Departamento de Agricultura, pela oportunidade e honra de ter estudado nesta renomada instituição.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos, ao CNPq, INCT-CAFÉ, e ao Consórcio Pesquisa Café, pelo apoio ao projeto.

Ao pesquisador (Coorientador) César Elias Botelho, pelo incentivo, ensinamentos e convivência diária ao longo desses anos.

Ao professor (Orientador) Rubens José Guimarães (UFLA), pelos ensinamentos e amizade nesses anos.

Ao professor Tiago Teruel Rezende (UNIFENAS), pela ajuda nas análises estatísticas e a grande contribuição no trabalho.

Ao colega de trabalho no Senar e professor U.N.A de Bom Despacho Vinicius Teixeira Lemos, pela contribuição nas reuniões do trabalho.

Aos membros da banca avaliadora Professor Douglas Ramos Guelfi Silva, pela ajuda no planejamento desse trabalho, ao pesquisador da Epamig Gladyston Rodrigues Carvalho e ao Professor da Unesp Alex Mendonça de Carvalho, por aceitar o convite de participação na banca.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, Marli dos Santos Túlio, por toda atenção, disponibilidade e ajuda durante todo o curso.

Aos amigos do Núcleo de Estudos em Cafeicultura (NECAF), Tisse, Nerso e Capelinha, pela ajuda nas avaliações e condução do experimento.

RESUMO

A nutrição equilibrada é condição para o alcance do pleno crescimento, desenvolvimento e produtividade do cafeeiro. A cafeicultura brasileira tem usado novas cultivares lançadas pelos institutos de pesquisa e pelas universidades. Com isso, conhecer as necessidades nutricionais das novas cultivares é essencial para se estabelecer recomendações nutricionais precisas e seguras, para expressar seu máximo potencial produtivo. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o crescimento inicial e nutrição de cultivares de café arábica em ambiente controlado, com diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio. Os experimentos foram instalados, em janeiro de 2018, em casa de vegetação, no Campo Experimental da EPAMIG, em Lavras – MG, no campus da Universidade Federal de Lavras- UFLA. Foram feitos três experimentos, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4 x 4, sendo três cultivares de café arábica (Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2), em 4 doses (0, 50, 100 e 150%), dos nutrientes testados (N, P e K), com base na recomendação de Guimarães *et al.* (1999), em 4 repetições. No experimento 1, variaram-se as doses de N, utilizando-se a fonte ureia; no experimento 2 variaram-se as doses de P e a fonte utilizada foi o superfosfato triplo; e, no experimento 3, variaram-se as doses de K e a fonte utilizada foi o cloreto de potássio. As parcelas foram constituídas de um vaso com uma planta por vaso. Avaliou-se: a altura das plantas, diâmetros de caule, índice de área foliar em cm² e o acúmulo dos nutrientes na matéria seca das folhas, em quatro épocas (de 2 em 2 meses), sendo a primeira avaliação feita no mês de março de 2018, e a última em dezembro do mesmo ano. Concluiu-se que a cultivar MGS Paraíso 2 foi mais eficiente no aproveitamento do N aplicado, com maior ganho em altura, entre as doses de 3 a 6 g planta⁻¹ de N por vaso, e menos exigente em P, com maior ganho em altura, na dose 0 g planta⁻¹ de P₂O₅ em relação às demais cultivares avaliadas. A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, mostrou ser mais exigente em N, com ganho em altura superior às demais, somente na dose 9,99 g planta⁻¹ de N, e mais exigente em P, com maior ganho em altura na dose 15 g planta⁻¹ de P₂O₅. - A cultivar MGS Ametista, teve menor ganho em altura que a cultivar Catuaí vermelho IAC 144 na dose de 9,99 g planta⁻¹ de N e não mostrou ganho em altura nas diferentes doses de P₂O₅ aplicadas.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Adubação. Nutrição mineral.

ABSTRACT

Balanced nutrition is necessary to achieve full coffee growth, development, and productivity. Brazilian coffee farming has used new cultivars launched by research institutes and universities. Thus, knowing the nutritional needs of the new cultivars is essential to establish precise and safe nutritional recommendations to express their maximum productive potential. The objective of this work was to evaluate the initial growth and nutrition of Arabic coffee cultivars in a controlled environment using different doses of nitrogen, phosphorus, and potassium. The experiments were installed in January 2018, in a greenhouse in the Experimental Field of EPAMIG, in Lavras-MG, on the campus of Universidade Federal de Lavras - UFLA. Three experiments were conducted using a completely randomized design, in a 3x4x4 factorial scheme, with three cultivars of Arabic coffee (Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista, and MGS Paraíso 2), in four doses (0, 50, 100, and 150%) of the tested nutrients (N, P, and K), based on the recommendation of Guimarães *et al.* (1999), in four replicates. In experiment 1, the doses of N were varied using urea as a source. In experiment 2, the doses of P were varied using triple superphosphate as a source. And in experiment 3 the K doses were varied using potassium chloride as a source. The plots consisted of one pot with one plant per pot. The characteristics evaluated were plant height, stem diameter, leaf area index in cm², and nutrient accumulation in the dry leaf matter. The experiment consisted of four seasons (every two months), the first assessment conducted in March 2018 and the last in December of the same year. In conclusion, cultivar MGS Paraíso 2 was more efficient in using N applied, with a greater gain in height, between the doses from 3 to 6 g plant⁻¹ of N per pot, and less demanding in P, with a greater gain in height with the dose of 0 g plant⁻¹ of P₂O₅ compared to the other cultivars evaluated. Cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 was more demanding in N, with height gain superior to the others only in the dose of 9.99 g plant⁻¹ of N, and more demanding in P, with a greater height gain with the dose of 15 g plant⁻¹ of P₂O₅. The cultivar MGS Ametista showed less height gain than the cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 with the dose of 9.99 g plant⁻¹ of N, showing no height gain in the different doses of P₂O₅ applied.

Keywords: Coffea arabica. Fertilizing. Mineral nutrition.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Ganho em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66, e 9.99 g planta⁻¹). 34
- Figura 2 - Ganho médio em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹). 36
- Figura 3 - Teor de Nitrogênio nas folhas das cultivares, Catuaí IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹). 38
- Figura 4 - Ganho em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P₂O₅ (0, 5, 10 e 15 g planta⁻¹). 40
- Figura 5 - Ganho em diâmetro do caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de P₂O₅, (0, 5, 10 e 15 g planta⁻¹). 42
- Figura 6 - Ganho em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P₂O₅ (0, 5, 10, e 15 g planta⁻¹). 44
- Figura 7 - Teor de fósforo nas folhas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P₂O₅ (0, 5, 10, e 15 g planta⁻¹). 45
- Figura 8 - Ganho em altura de plantas, das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K₂O (0, 1.44, 2.88, e 4.32 g planta⁻¹). 46
- Figura 9 - Ganho em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K₂O (0, 1.44, 2.88, e 4.32 g planta⁻¹). 48
- Figura 10 - Teor de potássio nas folhas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K₂O (0, 1.44, 2.88 e 4.32 g planta⁻¹). 49
- Figura 11 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de N (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹). 51

Figura 12 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de N (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta ⁻¹).	52
Figura 13 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P ₂ O ₅ (0, 5, 10 e 15 g planta ⁻¹).	54
Figura 14 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P ₂ O ₅ (0, 5, 10 e 15 g planta ⁻¹).	55
Figura 15 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K ₂ O (0, 1.44, 2.88 e 4.32 g planta ⁻¹).	56
Figura 16 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K ₂ O (0, 1.44, 2.88 e 4.32 g planta ⁻¹).	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de N, aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	33
Tabela 2 -	Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no ganho em altura das plantas.	33
Tabela 3 -	Análise de variância para ganho em diâmetro de caule sob diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	35
Tabela 4 -	Análise de variância do teor de nitrogênio encontrado nas folhas das plantas submetidas à diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	37
Tabela 5 -	Teor médio de Nitrogênio encontrado nas folhas das plantas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	37
Tabela 6 -	Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de P ₂ O ₅ , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	39
Tabela 7 -	Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de P ₂ O ₅ , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no ganho em altura.....	39
Tabela 8 -	Análise de variância para o ganho em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 com a variação da dose de P ₂ O ₅	41
Tabela 9 -	Análise de variância para área foliar de plantas, submetidas à diferentes doses de P ₂ O ₅ , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	43
Tabela 10 -	Área foliar média das plantas das cultivares Catuaí IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.	43
Tabela 11 -	Análise de variância para o teor de fósforo nas folhas das plantas sob diferentes doses de P ₂ O ₅ , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.	44

Tabela 12 - Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no teor de fósforo nas folhas.	45
Tabela 13 - Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de K_2O , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.....	46
Tabela 14 - Análise de variância para ganho em diâmetro de caule sob diferentes doses de K_2O , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.	47
Tabela 15 - Análise de variância para o teor de potássio nas folhas das plantas sob diferentes doses de K_2O , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.	48
Tabela 16 - Teor médio de potássio nas folhas das plantas das cultivares Catuaí IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	A importância da cultura do cafeeiro	15
2.2	Fertilidade do solo e nutrição mineral do cafeeiro	15
2.3	Diagnose do estado nutricional de plantas	16
2.4	Importância dos Nutrientes (NPK)	19
2.4.1	Nitrogênio	19
2.4.2	Fósforo	20
2.4.3	Potássio	21
2.5	Eficiência nutricional	22
2.6	Características das Cultivares	25
2.6.1	‘Catuaí IAC 144’	25
2.6.2	MGS Paraíso 2	26
2.6.3	MGS Ametista	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Avaliações realizadas	29
3.2	Análises estatísticas	30
3.2.1	Análise de variância, regressão e estudo das médias	30
3.2.2	Curva de crescimento	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	Ganho em altura, diâmetro de caule e teor de nitrogênio foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Nitrogênio	33
4.2	Ganho em altura, diâmetro de caule, área foliar, e teor de fosforo foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Fósforo	39
4.3	Ganho em altura, diâmetro de caule e teor de potássio foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Potássio	46
4.4	A modelagem do crescimento de plantas	50
4.5	Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de N	51
4.6	Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de N	52
4.7	Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de P₂O₅	54
4.8	Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de P₂O₅	55
4.9	Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de K₂O	56
4.10	Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de K₂O	58
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor, exportador e segundo maior consumidor mundial de café (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION - ICO, 2020), com safra estimada na safra 2019/2020 de 61,63 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado, sendo 47,38 milhões de sacas de café arábica (*Coffea arabica* L.) e 14,25 milhões de sacas de café robusta (*Coffea canephora* Pierre). Minas Gerais é o principal estado produtor de café arábica, com 54% de todo o café produzido no Brasil, com uma previsão para 2019/2020 de 33,14 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2020).

Ao se observar a produtividade das lavouras de café brasileiras nos últimos 23 anos, nota-se aumento significativo, passando de 8,00 scs.ha⁻¹ em 1997, para 32,00 scs.ha⁻¹ na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2020), constata-se grande evolução, em razão das novas tecnologias disponíveis. Esse incremento de produtividade no decorrer dos anos, conseqüentemente altera as exigências nutricionais das cultivares de café, com provável diferença entre as cultivares de diferentes constituições genéticas. O lançamento de novas cultivares de cafeeiros, com maior capacidade produtiva, é feito com frequência pelas instituições de pesquisa, demandando maiores informações sobre as necessidades nutricionais dessas cultivares, principalmente nas condições adversas de fertilidade do solo, das regiões produtoras de café do país. Outra justificativa para se estudar as exigências nutricionais das novas cultivares de café é a necessidade de otimização das adubações em função do alto custo dos fertilizantes, que representam cerca de 20% do custo total de produção (ALMEIDA FHER *et al.*, 2012).

No primeiro ano de formação do cafeeiro, ocorre o crescimento dos ramos ortotrópicos e plagiotrópicos, preparando a planta para iniciar o período reprodutivo no segundo ano de formação. Nesse contexto, destaca-se a importância dessa fase, pois nela haverá o acúmulo dos nutrientes necessários para suprir as necessidades da planta na fase seguinte. Portanto, os padrões de absorção de nutrientes são diferentes dos da fase reprodutiva, havendo aumento das concentrações de N, P e K de forma linear e crescente (CAMARGO; CAMARGO, 2001; CARVALHO *et al.*, 2010). Desse modo, diversos fatores podem prejudicar o crescimento e o desenvolvimento do cafeeiro, com destaque para a nutrição inadequada. Assim, como no primeiro ano em campo o cafeeiro é mais sensível, o desequilíbrio nutricional atrapalha o seu desenvolvimento (ASSAD *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2019; TAIZ *et al.*, 2017). Esses fatores podem ocasionar prejuízos em longo prazo, como a redução da produtividade e da longevidade

da lavoura (BOTELHO *et al.*, 2010). Com isso, há necessidade do aumento da eficiência do uso dos fertilizantes, principalmente na fase de formação da lavoura cafeeira, de modo a fornecer os nutrientes de maneira equilibrada.

As diferentes cultivares de café podem ter exigências diferentes quanto à nutrição mineral, demandando manejos distintos para seu pleno desenvolvimento, mesmo estando em mesmas condições de cultivo (VILELA, 2014). O atual parque cafeeiro brasileiro é formado, principalmente, por lavouras dos grupos Catuaí e Mundo Novo, portando, com o aumento do plantio de novas cultivares, é importante que se conduzam novos trabalhos, buscando resultados que possibilitem uma nutrição suficiente e equilibrada para essas novas lavouras cafeeiras. Uma evidência da carência de tais resultados de pesquisa é que, já se percebe entre os agrônomos que praticam a assistência técnica diretamente aos cafeicultores, tentativas de ajustes na recomendação de fertilizantes para diferentes cultivares, em fases distintas do seu desenvolvimento, porém ainda sem uma base científica.

Assim, objetivou-se, com este trabalho, avaliar o crescimento inicial e nutrição de cultivares de café arábica em ambiente controlado, sendo uma dessas já bastante conhecida e largamente plantada no Brasil ('Catuaí IAC 144') e duas cultivares lançadas recentemente pela EPAMIG ('MGS Paraíso 2' e 'MGS Ametista').

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A importância da cultura do cafeeiro

O café é um produto de grande importância no mundo, sendo que na safra de 2018/2019, cerca de 170.937 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado foram produzidas. O Brasil participou com, aproximadamente, 36,8% dessa produção, com um total de 62,925 milhões de sacas, sendo o maior produtor e o maior exportador de café, exportando cerca de 60% da safra 18/19 (ICO, 2020).

Assim, a cafeicultura brasileira ocupa lugar de destaque no cenário agrícola nacional e internacional sendo que, na safra 2019/2020 a produção estimada é de aproximadamente 61,63 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado, sendo 47,38 milhões de sacas de café arábica (*Coffea arabica* L.) e 14,25 milhões de sacas de café robusta (*Coffea canephora* Pierre) (CONAB, 2020).

Minas Gerais destaca-se como o principal estado produtor de café arábica do Brasil, com produção estimada no ano agrícola 2019/2020 de 33,14 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado (54% volume total produzido no país), com parque cafeeiro formado por 1,24 milhão de hectares (1,03 milhão de hectares em produção - 83,06% e 203,57 mil hectares - 16,94% em formação (CONAB, 2020).

Nos últimos 23 anos, observou-se aumento expressivo de produtividade média das lavouras cafeeiras, passando de 8,00 scs.ha⁻¹ em 1997, para 32,00 scs.ha⁻¹ na safra de 2019/2020 (CONAB, 2020; EMBRAPA, 2020). Tal evolução se deve à geração e utilização de novas tecnologias de produção que, por sua vez, demanda atualização nas recomendações de fertilizantes para uma nutrição mineral suficiente e equilibrada.

2.2 Fertilidade do solo e nutrição mineral do cafeeiro

A recomendação de adubação para uma cultura depende de sua exigência nutricional para o crescimento vegetativo e reprodutivo, levando-se em consideração a eficiência de aproveitamento dos adubos aplicados e a fração de nutrientes suprida pelo solo (LAVIOLA *et al.*, 2007; PREZOTTI, 2001).

As plantas necessitam de nutrientes para a manutenção de seu crescimento e desenvolvimento, sendo esses, definidos como essenciais. Para isso, existem alguns critérios propostos por Arnon e Stout (1939), são eles: a) Um elemento é essencial se a planta não

conseguir completar seu ciclo de vida em sua deficiência; b) O elemento não pode ser substituído por outro com propriedades semelhantes e; c) O elemento deve participar diretamente do metabolismo da planta e seu benefício não pode estar somente relacionado ao fato de melhorar características do solo.

O cafeeiro, *Coffea arabica* L., é muito exigente em bases, sendo o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg), normalmente fornecidos por corretivos da acidez, sendo que a calagem traz benefícios como o fornecimento de Ca e Mg, a elevação do pH, com conseqüente diminuição da toxidez de alumínio (Al), manganês (Mn) e ferro (Fe), aumento da disponibilidade de P e da atividade microbológica do solo. Assim, a calagem constitui uma prática importante, considerando a grande extensão de solos ácidos ocupados pela cafeicultura no Brasil (MATIELLO; GARCIA; ALMEIDA, 2006).

Com base nesses critérios, os elementos considerados essenciais são carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cloro, cobre, manganês, ferro, molibdênio, níquel e zinco (MALAVOLTA, 2006). Esses nutrientes podem ser divididos em macro e micronutrientes. Dessa forma, pode-se citar a importância dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, os quais serão mencionados neste trabalho.

2.3 Diagnose do estado nutricional de plantas

A falta ou o excesso de um nutriente nas plantas causam anormalidades, típicas de cada nutriente, pois os sintomas são típicos diante das funções exercidas pelo referido nutriente. Assim, os sintomas contribuem para avaliar o estado nutricional do vegetal (GONTIJO; GUIMARÃES, 2008). Entretanto, antes da manifestação visível da deficiência, o crescimento e a produtividade já poderão estar limitados: é o que se denomina de “fome oculta”, que somente poderá ser detectada por meio da análise química do material vegetal ou da diagnose foliar (MALAVOLTA, 2006).

Assim, o estado nutricional das plantas pode ser determinado, por meio de procedimentos diretos ou indiretos, sendo os primeiros, aqueles em que as concentrações aparentes (análise visual) e ou reais (análise da matéria seca ou da seiva) dos nutrientes são determinadas. Já os indiretos são aqueles em que a concentração de determinado nutriente na planta é estimada, por meio de uma característica cujos valores sejam correlacionados com as concentrações do nutriente na planta (FONTES, 2001).

Assim, com procedimentos diretos ou indiretos é possível determinar o estado nutricional das plantas. Os métodos diretos são os mais utilizados, que consistem em diagnose visual, a análise de solo e a diagnose foliar (FONTES, 2001).

A observação visual dos sintomas é uma forma rápida e pouco dispendiosa de diagnóstico do estado nutricional, porém, sua principal limitação é que, quando constatada, parte da produtividade das plantas já estará comprometida. Como a água é o veículo para a absorção e transporte dos nutrientes, é comum que em períodos secos, alguns sintomas se acentuem (MARTINEZ *et al.*, 2014). Ressalta-se ainda que, condições climáticas severas podem agravar ou atenuar as deficiências e a toxidez, podendo mesmo condicionar seus aparecimentos (CARVALHO *et al.*, 2010; MALAVOLTA, 1980).

A folha é o órgão da planta para a análise química, pois, é onde ocorre o metabolismo e reflete bem, as mudanças na nutrição (CARVALHO *et al.*, 2001, 2010). Assim, a análise química foliar considera existir uma correlação positiva entre o suprimento de nutrientes e suas concentrações na planta e que aumentos ou decréscimos nessas concentrações relacionam-se com maiores ou menores produtividades (EVENHUIS; WAAR, 1980), sendo importante tecnologia para identificar e corrigir deficiências e desequilíbrios nutricionais na planta (BALDOCK; SCHULTE, 1996; MELDAL-JOHNSEN; SUMMER, 1980), monitorando e avaliando a eficiência do programa de adubação de determinada cultura (MELDAL-JOHNSEN; SUMMER, 1980) e a fertilidade do solo (DARA; FIXEN; GELDERMAN, 1992). A análise foliar utiliza a composição mineral da matéria seca para avaliar o estado nutricional das plantas e a fertilidade do solo (BATAGLIA; DENCHEN; SANTOS, 1992), em que a planta funciona como extrator químico.

Quando há excesso de um nutriente ou a falta dele, a planta pode manifestar sintomas característicos, sintomas estes que aparecem nas folhas velhas, folhas novas, caules e raízes, que são de grande importância, para se determinar o estado nutricional da planta. Muitas vezes, o sintoma de falta ou de excesso não é visível, o que se pode chamar de ‘fome’ ou ‘toxidez’ (oculta), detectada somente, por meio de análise química do material vegetal ou diagnose foliar (MALAVOLTA, 2006; PINTO *et al.*, 2013).

A interpretação do resultado da análise foliar é a comparação do valor da concentração de cada nutriente na amostra analisada com a concentração considerada padrão ou ótima, que leva em conta a relação entre a concentração do nutriente em determinada parte da planta (folha, mais comumente) e o crescimento ou produtividade da cultura, a faixa ideal de concentração do nutriente. Para tanto, faz-se a comparação da concentração de determinado nutriente na amostra enviada ao laboratório com a concentração desse nutriente em plantas normais ou com

padrões estabelecidos (FONTES, 2001). Os métodos mais comuns para a interpretação dos resultados da análise química consistem no uso do nível crítico e as faixas de suficiência ou faixas críticas. Mas, outras metodologias existem, como o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS), Desvio Percentual Ótimo (DPO), e Análise de Plantas com Escores Padronizados (PASS), que utilizam procedimentos matemáticos para derivar índices utilizados para interpretar os resultados da análise química de tecidos vegetais (CARVALHO *et al.*, 2001).

Na literatura, são encontrados diversos trabalhos com recomendações de adubação e estabelecimento de faixas críticas para o cafeeiro (ALMEIDA; LOPES; DEUS, 2003; ANDRADE *et al.*, 2001; CHAVES; ANDROCIOLI FIHO, 2003; COSTA *et al.*, 2001; MALAVOLTA *et al.*, 1993; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999; MILLS; JONES JUNIOR, 1996; RAIJ *et al.*, 1997; REUTER; ROBINSON, 1988). No entanto, as exigências nutricionais do cafeeiro podem variar entre cultivares, de ano a ano, bem como durante o ano, sendo o período reprodutivo o de maior requerimento nutricional pela planta. Portanto, conhecer as variações nos teores de nutrientes nas folhas de diferentes cultivares e em vários ambientes é importante para auxiliar no diagnóstico do status nutricional das plantas (LAVIOLA; MARTINEZ, 2007).

Especialmente na fase de implantação da lavoura, alguns trabalhos foram realizados também para determinação de níveis/faixas críticas de nutrientes e recomendação de adubação para o cafeeiro em condições de irrigação, no primeiro ano após o plantio em casa de vegetação (CLEMENTE *et al.*, 2008) e no campo (PINTO *et al.*, 2013; SOBREIRA *et al.*, 2011) e, no segundo ano após o plantio (SOBREIRA *et al.*, 2011; VILLELA *et al.*, 2015) e em lavouras em produção, inclusive após poda do tipo recepa (RESENDE, 2019).

A fase vegetativa das plantas perenes é ininterrupta, variando de intensidade, durante o ano, em razão da fenologia da planta, força dreno dos órgãos e das condições ambientais. De maneira geral, as condições favoráveis ao crescimento da parte aérea são alcançadas com temperaturas acima de 12,5°C, disponibilidade hídrica e fotoperíodo longo (ALVES; LIVRAMENTO, 2009).

A resposta ao aumento das doses pode estar condicionada à idade fenológica da cultura, como demonstrado por Magalhães, Sampaio e Silva (1987), em experimento conduzido por três anos agrícolas (1982/83 a 1984/85), concluindo que o cafezal formado não respondeu à aplicação de N, P e K nos dois primeiros anos, no entanto, no terceiro ano agrícola, houve resposta linear para N e K₂O.

Matiello *et al.* (2002) citam que, na fase de formação em uma lavoura conduzida em Varginha – MG, com as cultivares dos grupos Mundo Novo e Catuaí, as exigências aumentaram

de forma quase geométrica, da muda até a idade de 18 meses, sendo os nutrientes necessários exigidos na seguinte ordem: N, K, Ca, Mg, P e S para os macronutrientes e Fe, Mn, B, Cu e Zn para os micronutrientes.

Quando se faz uma adubação com N, P e K, deve-se ter atenção, também, para os teores de cálcio (Ca), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn) e Zinco (Zn), a fim de detectar possíveis antagonismos entre esses nutrientes e aqueles adicionados. Cuidados também devem ser tomados quanto à aplicação do calcário (alterando o pH do solo) que poderá aumentar a necessidade de micronutrientes (LANA *et al.*, 2010).

2.4 Importância dos Nutrientes (NPK)

2.4.1 Nitrogênio

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade, pela cultura do café (MALAVOLTA *et al.*, 1993), em consequência das funções que exerce como constituinte de moléculas de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos e citocromos, dentre outros. Quando o fertilizante nitrogenado é aplicado, parte dele é recuperada pelo sistema radicular e parte aérea, parte permanece no solo enquanto outra porção pode ficar imobilizada na serapilheira ou pode se perder do sistema solo-planta.

Resultados obtidos, sob os mais diversos sistemas agrícolas, mostraram que raramente uma cultura aproveita mais de 60% do N aplicado como fertilizante e seus efeitos na planta podem ser resumidos da seguinte forma: a) aumento da área foliar da planta, com consequente aumento da fotossíntese e dos compostos fundamentais, como proteínas, ácidos nucleicos e constituintes de membranas; b) não havendo fatores limitantes, promove desenvolvimento rápido, com aumento da ramificação dos galhos produtivos e da formação de folhas verdes e brilhantes; c) aumenta o número de folhas e número de gemas floríferas; d) aumenta o crescimento da área foliar, proporcionando maior produção de amido e de outros carboidratos indispensáveis para a formação e o crescimento dos frutos.

Em lavouras adultas a deficiência de N aparece com intensidade, durante o crescimento dos frutos, quando as folhas formadas são geralmente menores. Nessas condições, as folhas mais velhas e, posteriormente, as mais novas apresentam uma clorose uniforme do limbo e se a deficiência for muito severa, as folhas ficam quase brancas e entram em necrose; o desfolhamento é comum, observando-se, ainda, em um estágio muito avançado de deficiência, a morte descendente dos ramos frutíferos (PEREIRA, 1999).

As quantidades de N, adicionadas às culturas, dependem do teor de N mineral que o solo pode fornecer em determinada fase de desenvolvimento da cultura. A matéria orgânica (MO) é a principal fonte de N no solo, sendo que mais de 85% do N encontram-se na forma orgânica; seu teor é muito variável e depende do processo de mineralização (MALAVOLTA, 1986).

O excesso de N desequilibra as relações N/P e N/K diminuindo a produção e aumentando a vegetação, prejudicando, também, a bebida (GUIMARÃES; MENDES, 1997). A relação adequada de N/P está na faixa de 16–18, de N/K 1,3 – 1,4 e N/S 16 – 18 (MALAVOLTA *et al.*, 1993).

2.4.2 Fósforo

Em relação à adubação fosfatada, observa-se que a falta desse nutriente causa distúrbios imediatos no metabolismo e no desenvolvimento das plantas (LAWLOR; CORNIC, 2002). Também, não deve ser fundamentada, exclusivamente, na produção de grãos em formação, pois as aplicações de fertilizantes, também, devem ter por objetivo o crescimento de novos ramos e internódios para a safra futura (GUERRA *et al.*, 2006).

Decréscimos da ciclagem de P entre o citoplasma e o estroma, gerados por redução da absorção de P no solo (HENDRICKSON; CHOW; FURBANK, 2004; SANTOS *et al.*, 2006), podem levar a diminuições no consumo e na produção de ATP e NADPH, menor carboxilação/regeneração de RuBP (SHUBHRA *et al.*, 2004), decréscimo na expressão de genes relacionados à fotossíntese (LAWLOR; CORNIC, 2002), fechamento estomático (FLÜGGE *et al.*, 2003) e menor condutância do mesófilo (LAWLOR; CORNIC, 2002).

A disponibilidade adequada de P proporciona cafeeiros bem desenvolvidos e vigorosos, o que, em última instância, determina boas produtividades. Observações de campo têm demonstrado que há aumento da produtividade com o uso de adubo fosfatado acima das quantidades recomendadas (SILVA *et al.*, 2010). Todavia, a maior parte dos estudos publicados, sobre a presença de P, referem-se aos efeitos da baixa disponibilidade desse elemento no metabolismo vegetal, crescimento e nutrição das plantas (HENDRICKSON; CHOW; FURBANK, 2004; LÓPEZ-BUCIO *et al.*, 2002; REIS JUNIOR; MARTINEZ, 2002), com pouca ênfase aos possíveis efeitos de altas concentrações desse nutriente no solo.

Assim, a maioria das recomendações de adubação para o cafeeiro encontradas na literatura (GUIMARÃES *et al.*, 1999; RAIJ *et al.*, 1997) sugerem que a exigência de P em cafeeiros adultos é pequena, em decorrência, principalmente, da baixa exportação desse

elemento pelos grãos e que as doses máximas recomendadas de P_2O_5 situam-se em torno $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, considerando a produtividade esperada e a quantidade de P disponível no solo.

Andrade (2004) recomenda doses máximas de $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ para solos com baixo teor de P e com potencial de produtividade superior a $80 \text{ sc} \cdot \text{ha}^{-1}$. Também, Guerra *et al.* (2007) obtiveram resultados indicando a necessidade de ajustar o fornecimento de nutrientes, notadamente o P, para reduzir os efeitos da bienalidade do cafeeiro, isso porque os cafeeiros, normalmente, produzem em ramos novos, portanto, necessitam de energia para crescer e formar novas gemas reprodutivas para produzir adequadamente todos os anos.

Por muitos anos, o cafeeiro foi considerado como pouco responsivo à aplicação de P. No entanto, alguns trabalhos têm mostrado que a cultura é capaz de responder a aumentos das doses de P, principalmente, quando cultivados em solos de baixa fertilidade natural (DOMINGHETTI *et al.*, 2014; GUERRA *et al.*, 2008; PREZOTTI; ROCHA, 2004; SOUZA *et al.*, 2014). Reis *et al.* (2013) obtiveram respostas lineares do cafeeiro ao estender a dose até de $400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 .

2.4.3 Potássio

A exigência do K aumenta com a idade e, principalmente, com a frutificação, ocorrendo a translocação do K das folhas para os frutos em função da alta mobilidade do nutriente (CARVALHO *et al.*, 2010). A absorção de K é semelhante a do N, com maior destaque em épocas chuvosas, quando se encontram maiores teores de K nas folhas e, durante as épocas mais secas menores teores foliares em face da menor absorção e extração dos K pelos frutos. O teor foliar, considerado adequado, é de 1,9 a $2,4 \text{ g Kg}^{-1}$ e a relação de P/K ideal para que não ocorra desequilíbrio é de 16 a 18 (MALAVOLTA *et al.*, 1993).

Em relação ao K, sua importância pode ser resumida da seguinte maneira: é um cátion de alta mobilidade na planta, sendo de fundamental importância em sua atividade metabólica, como, por exemplo, no transporte de longa distância via xilema e floema, no equilíbrio osmótico de células e de tecidos, na ativação de enzimas, no movimento de estômatos e na lignificação de feixes vasculares (CARVALHO *et al.*, 2010; PEREIRA, 1999).

A quantidade de K nas partes vegetativas e nos frutos do cafeeiro demonstra que esse elemento desempenha um papel muito importante na nutrição do cafeeiro. Há correlação positiva entre o teor de K nas folhas e o seu conteúdo de amido, de tal forma que, ao baixar o nível de K, a produção de amido diminui e, conseqüentemente, reduzindo o desenvolvimento

das plantas, o aparecimento de novos ramos e de novas folhas e a produção (CARVALHO *et al.*, 2010; PEREIRA, 1999).

A primeira indicação da falta de K aparece nas folhas mais velhas, como resultado da translocação para as folhas novas ou para os ramos em crescimento e, ou, para os frutos em formação; as manchas pardas, inicialmente formadas, gradualmente coalescem e uma faixa marrom-escura se forma na ponta da folha e nas margens adjacentes, levando ao desprendimento fácil do ramo; e, com frequência, apenas um ou dois pares de folhas permanecem presos ao ramo, que começa a morrer da ponta para a base (“dieback”) (CARVALHO *et al.*, 2010; PEREIRA, 1999).

O excesso de K pode levar a uma deficiência de Ca e Mg. Em solos desequilibrados com esses elementos não ocorre resposta de produção para níveis de K, aplicados na adubação (MATIELLO, 2008). O fornecimento de P tende a diminuir o efeito depressivo do K no teor foliar do Mg (MALAVOLTA, 2006).

Considerando-se que a fonte desse nutriente deve tornar-se escassa nas próximas décadas (ZHANG *et al.*, 2006), contribuindo para elevar os preços dos formulados NPK, faz-se necessário intensificar pesquisas no âmbito de substituir e/ou elevar a eficiência de uso das fontes existentes.

Quanto ao K, pode haver pouco fornecimento pelo solo, uso de doses insuficientes na adubação e perdas de nutriente por lixiviação em virtude da menor adsorção, quando comparado com o Ca, Mg e Al. Pode, ainda, haver desbalanço no fornecimento desse elemento, pelo solo, em decorrência da sua relação com Mg, conforme relatam Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Marschner (1997).

O K tem sido considerado, há muito tempo, como o “elemento da qualidade” em nutrição de plantas (MALAVOLTA, 1980), porém a qualidade dos produtos agrícolas não é facilmente definida ou medida como se faz no tocante à produção. O padrão de qualidade depende dos propósitos pelos quais a planta ou parte dela é utilizada (MENGEL; KIRKBY, 1987), sendo que no caso do cafeeiro, o reflexo da adubação na produção é tão importante quanto os efeitos sobre os compostos orgânicos que identificam a qualidade da bebida desejada (SILVA *et al.*, 1999).

2.5 Eficiência nutricional

O termo ‘eficiência nutricional’ é utilizado para caracterizar plantas em sua capacidade de absorver e utilizar nutrientes, estando relacionado à eficiência de absorção, translocação e

utilização de nutrientes. A eficiência de absorção está relacionada à taxa de absorção de nutrientes por unidade de comprimento ou de massa de raiz e pode ser avaliada em estudos de cinética de absorção de nutrientes (BALIGAR; FAGERIA, 1998). Segundo Vose (1987), a definição de eficiência já é, em si mesma, um ponto de discussão; existem plantas, variedades e genótipos “responsivos” e “não responsivos” ao acréscimo de um determinado nutriente; “eficientes” e “não eficientes” na conversão do nutriente em matéria seca; “eficientes” e “ineficientes” para absorção ou translocação; e “acumuladores” ou “não acumuladores” de certos elementos. O autor relatou, ainda, que devem ser considerados, além dos fatores determinantes de produção da planta, a velocidade de crescimento, os métodos de cultivo, a fertilidade natural do solo e as exigências nutricionais.

Para Clark e Duncan (1991), também, há um grande e confuso número de definições, além da falta de consenso sobre quais características são as mais importantes para o estudo da eficiência, termo que é usado, frequentemente, em relação a diferenças de genótipos e espécies na absorção e uso dos nutrientes. Sauerbeck e Helal (1990) consideram fundamental a pesquisa em busca de plantas com maior eficiência na utilização de nutrientes, portanto, indicam como aspectos mais importantes a serem considerados os que têm relação com as propriedades morfológicas e fisiológicas da raiz, as relações raiz/parte aérea que influenciam a translocação e redistribuição de nutrientes e as interações solo-raiz relacionadas com a disponibilidade dos nutrientes.

Furtini Neto (1994) cita dois conceitos de eficiência de uso: um, do ponto de vista agrônomo (GRAHAM, 1984), que seria a eficiência de um genótipo em fornecer altas produções em um solo pobre em determinado nutriente, em relação a um genótipo considerado como padrão; e outro, do ponto de vista fisiológico (GODDARD; HOLLIS, 1984), que salienta a eficiência de um genótipo em absorver o nutriente do solo, distribuí-lo e utilizá-lo internamente. Além das respostas dos nutrientes, a eficiência da adubação está relacionada, também, ao custo/benefício que esta proporciona; em outras palavras, a dose do adubo que proporciona o maior valor entre a receita e o custo do insumo representa a máxima produtividade econômica (MALAVOLTA *et al.*, 1993).

Normalmente, a maior economicidade é encontrada na dose que proporciona entre 80 a 100% da produção máxima. No entanto, é consensual uma produção relativa de 90% como a produtividade máxima econômica (RAIJ, 1981). A maior ou menor produção de frutos por unidade de nutrientes na planta pode ser explicada por diferenças na eficiência de aquisição, de translocação e/ou de utilização dos nutrientes. A aquisição de nutrientes depende da eficiência dos mecanismos de absorção e do volume de solo explorado pelas raízes e pode ser avaliada

pelas eficiências de absorção e de produção de raízes. Por sua vez, a eficiência de utilização de nutrientes depende do seu transporte para a parte aérea e de sua exigência metabólica, sendo obtida pelo quociente entre a biomassa total da planta e a concentração do nutriente (SIDDIQI; GLASS, 1981). Tradicionalmente, a eficiência de utilização de nutrientes tem sido definida como a razão entre a biomassa e a quantidade total de nutriente na biomassa (TOMAZ; AMARAL, 2008).

O ciclo fenológico do cafeeiro pode variar, de acordo com a região em que está estabelecido, sendo mais longo em regiões de elevada altitude. Em função disso, é possível que o pico de exigência nutricional em cafeeiros plantados nessas regiões seja mais tardio que naquelas de baixa altitude. Dessa forma, as épocas e os intervalos entre as práticas de adubação deveriam ser diferenciados, levando-se em conta o período de maior exigência nutricional do cafeeiro em cada região (LAVIOLA; MARTINEZ, 2007).

O grupo de cultivares Catuaí, comparado ao grupo Mundo Novo, é menos exigente em N e P, mais exigente em K, Ca, B, Fe, Mn e Zn e, praticamente, apresentam a mesma exigência em Mg, S e cobre (Cu) (MALAVOLTA *et al.*, 1993). Por sua vez, a ‘Mundo Novo’, quando comparada à ‘Rubi MG-1192’, é menos eficiente na utilização de S (SOUZA, 1999). Pereira (1999), também, discriminou linhagens de cafeeiros arábicos com base na eficiência de utilização de N e K.

A recomendação de adubação de uma cultura depende de sua exigência nutricional para o crescimento vegetativo e reprodutivo e, também, deve-se levar em consideração a eficiência de aproveitamento dos adubos aplicados e a fração de nutrientes suprida pelo solo (LAVIOLA *et al.*, 2007; PREZOTTI, 2001). Grande parte do parque cafeeiro do Brasil está implantada em solos com sérias limitações de ordem química e nutricional ao desenvolvimento normal das plantas (GUIMARÃES, 1992).

Diversos experimentos foram realizados com o intuito de identificar a dose de N e K mais adequada ao cafeeiro, contudo, ainda há muitas contradições entre os resultados, em função das diversas variáveis envolvidas, como solo, clima, irrigação, espaçamentos, produtividade, fertirrigação e também a cultivar. As exigências minerais do cafeeiro variam entre cultivares, de ano a ano, bem como durante o ano, sendo o período reprodutivo o de maior requerimento nutricional pela planta. Tal fato demonstra serem necessários estudos específicos para cada região e sistemas de cultivo (SOBREIRA, 2010).

O conhecimento da dinâmica dos nutrientes minerais nas cultivares de cafeeiro, principalmente no que se refere a flores e frutos, é importante para identificar o período de maior exigência nutricional pela planta e, dessa forma, melhorar a eficiência das práticas de

adubação. Além disso, conhecer as variações nos teores de nutrientes nas folhas e sua mobilização para os frutos, durante a fase reprodutiva de cultivares de cafeeiro, em diferentes ambientes, é importante para auxiliar no diagnóstico do status nutricional das plantas, podendo melhorar o manejo de fertilização da cultura (LAVIOLA; MARTINEZ, 2007).

A prática da adubação do cafeeiro, ainda, apresenta aspectos tradicionais ou de forma não correta, decorrentes das recomendações baseadas na reposição dos nutrientes, mas em quantidades mais elevadas do que a necessária, predominando a aplicação da fórmula 20-5-20, onde a análise de solo ou não é feita ou, então, não é seguida para uma correta recomendação.

Na avaliação do estado nutricional do cafeeiro, também, deve ser considerada a interação entre os nutrientes, ou seja, a capacidade que um determinado nutriente tem de alterar a concentração de outro em virtude do antagonismo, à inibição ou ao sinergismo entre ambos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; SOBRAL, 1998 *apud* SILVA *et al.*, 2008).

2.6 Características das Cultivares

2.6.1 ‘Catuaí IAC 144’

Originou-se como produto de recombinação a partir de um cruzamento artificial entre cafeeiros selecionados, pela produtividade, das cultivares Caturra Amarelo, IAC 476-11 e Mundo Novo IAC 374-19, de *C. arabica*. A hibridação foi realizada em Campinas, em 1949 e o híbrido recebeu o prefixo IAC H 2077. Teve-se em vista transferir para a cultivar Mundo Novo o fator dominante Caturra (CtCt), o qual confere porte baixo, por meio da redução do comprimento dos internódios. Na população F3 (IAC H2077-2-5), homozigota, CtCt e heterozigota para os alelos Xcxc, responsáveis pela cor do exocarpo, selecionaram-se plantas com frutos de cor vermelha. Aos descendentes desses cafeeiros na geração F4 e gerações subsequentes, caracterizados por serem vigorosos e altamente produtivos, deu-se a denominação de Catuaí Vermelho. O termo Catuaí, em tupi-guarani, significa “muito bom”. A cultivar foi lançada para fins comerciais, em 1972, pelo IAC e registrada no Registro Nacional de Cultivares (RNC), em 1999.

Esta cultivar é suscetível à ferrugem e aos nematoides, mas possui elevado vigor. A altura das plantas pode atingir 2 a 2,4m, em média e o diâmetro da copa, de 1,7 a 2,1m. Em algumas regiões cafeeiras, como em Patrocínio, MG, essas dimensões podem ser bem maiores. Os internódios são curtos e a ramificação secundária é abundante. O sistema radicular é bem desenvolvido. As folhas novas são de cor verde-clara e as adultas, verde-escuro brilhante. As

inflorescências ocorrem em número de 3 a 5 por axila foliar, com três a cinco flores por inflorescência. Usualmente, os dois florescimentos principais ocorrem nos meses de setembro e outubro, e a maturação dos frutos é dos meses de maio a junho. O número médio de dias, desde a fertilização à maturação completa dos frutos, nas condições de Campinas, SP, é de 230 dias. O peso médio do fruto varia de 1,10 a 1,24g e o peso médio de 1.000 sementes do tipo chato, de 102 a 123g. O valor da peneira média é 6,5. A porcentagem de sementes normais, do tipo chato, oscila de 82,3% a 89,1%. O rendimento é em torno de 50%. A produção média de café beneficiado, em espaçamentos normais, varia de 1.800 a 2.400kg por ha. Produções de até 6.000kg podem ser obtidas em anos de elevada produção e em espaçamentos menores. Em plantios adensados ou superadensados, a produtividade anual pode alcançar, em média, até 3.000kg. Em áreas irrigadas e no espaçamento de 3,8m x 0,5m, como ocorre em Barreiras, BA, a produtividade média chega a ser de 3.600kg/ha. A qualidade da bebida é excelente. A participação da cultivar Bourbon Vermelho em sua formação é de 75%.

A cultivar Catuai IAC 144 foi registrada no Registro Nacional de Cultivares (RNC) em 1999. Essa cultivar vem apresentando ampla capacidade de adaptação, sendo boa de produção na maioria das regiões cafeeiras onde estão sendo plantadas. Em razão do pequeno porte, permite maior densidade de plantio, tornando a colheita mais econômica e facilitando os tratamentos fitossanitários. Os espaçamentos indicados variam de 2 a 3,5m entre linhas e de 0,5 a 0,6m entre plantas, com uma planta por cova, nas regiões mais quentes, e nas regiões frias, de 2 a 3,5m x 0,7 a 1,0m entre plantas. Atualmente, nos espaçamentos adensados, têm-se utilizado 2m, 2,8m e 3m entre ruas e 0,5 e 0,6m entre plantas, obtendo-se, assim, produções anuais elevadíssimas, em torno de 60 a 80 sacas de café beneficiado por hectare.

2.6.2 MGS Paraíso 2

É resultante da hibridação artificial de um cafeeiro do cultivar Catuaí Amarelo IAC 30 com o acesso de Híbrido de Timor UFV 445-46, doador dos genes de resistência à ferrugem. O cruzamento foi realizado em 1980 na Universidade Federal de Viçosa, UFV e o processo final de seleção foi realizado nos municípios de Patrocínio e Monte Carmelo. Essa cultivar apresenta porte baixo, internódios curtos, com ramificações secundárias abundantes. Os frutos são de coloração amarela quando maduros, sementes graúdas, e maturação uniforme. As folhas novas possuem coloração verde, e quando adultas, verde-escura brilhante, com as bordas do limbo foliar ligeiramente onduladas. Os cafeeiros apresentam altura média de 1,95 m, aos 72 meses após o plantio no campo e formato cônico da copa (BOTELHO *et al.*, 2010).

Apresenta resistência ao agente causal da ferrugem. É uma excelente variedade de café para as condições do Cerrado, tanto para o cultivo irrigado quanto sequeiro. Além disso, apresenta boa resposta à colheita mecanizada e à poda. Possui alta porcentagem de grãos chatos nas peneiras mais altas, apresentado, em média de quatro colheitas 67,9% nas peneiras 16 e acima.

A produtividade média da cultivar MGS Paraíso 2 vem se mostrando de elevada produtividade em diversos municípios estudados, demonstrando ampla adaptação às regiões produtoras de café de Minas Gerais. Em talhão comercial conduzido pela EPAMIG, no Campo Experimental de Patrocínio, em sistema de cultivo sequeiro a cultivar MGS Paraíso 2 obteve produtividade média de 49,4 sacas ha⁻¹ em cinco colheitas e em espaçamento 3,5 m x 0,7 m. Já em propriedades em sistema de cultivo irrigado no cerrado, as produtividades encontradas foram de 42, 44 e 55 sacas por ha⁻¹, em médias de 4 e 5 safras, em espaçamentos de 3,70 m x 0,70 m e 3,70 m x 0,75 m.

A elevada qualidade de bebida dessa cultivar também tem despertado interesse nos cafeicultores que se dedicam à produção de cafés especiais. O aroma é adocicado, com sabor de frutas vermelhas, acidez prazerosa, corpo aveludado, com ótima doçura. Vencedora do Prêmio Região do Cerrado Mineiro por dois anos consecutivos (2015 e 2016), a bebida obteve 87,79 pontos na prova de xícara pela escala da Associação de Cafés Especiais (SCA). Em investigação sobre a qualidade de bebida de grupos de genótipos de café arábica submetidos ao processamento via úmida, a MGS Paraíso 2 apresentou nota final de 91,75 pontos, sendo classificado como um café excepcional dentro da classificação da SCA.

Possui alta capacidade de vigor vegetativo e crescimento radicular na fase de mudas. Em trabalho realizado comparando oito cultivares comerciais, essa cultivar se destacou, apresentando maior matéria seca da parte aérea. Em trabalho conduzido em condições controladas, a cultivar apresentou maior eficiência do uso do fósforo em condições de baixa disponibilidade do nutriente (VILELA, 2020). Considerando o porte baixo, recomendam-se plantios em renque mecanizado de 4 a 6 mil plantas sacas ha⁻¹ (BOTELHO *et al.*, 2010).

2.6.3 MGS Ametista

Cruzamento entre ‘Catuaí Amarelo IAC 86’ e ‘Híbrido de Timor UFV 446-08’, com o registro H 516, do qual foi selecionada a planta 2, na geração F1, com maturação intermediária a tardia dos frutos, a Ametista possui porte baixo e também é resistente a ferrugem. Apresenta frutos vermelhos, elevada capacidade produtiva, sendo responsiva à poda do tipo

esqueletamento. É uma excelente cultivar de café para as condições do Cerrado e para regiões de menor altitude e com maiores temperaturas no Sul de Minas sendo tolerante à seca e adaptada a solos arenosos, espaçamento indicado entre plantas 0,5 a 0,8 m (CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram instalados, no começo de janeiro, de 2018, em casa de vegetação da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), no CELA (Campo Experimental Lavras) em Lavras – MG, cada parcela experimental consistiu de um vaso plástico com volume de dez litros de substrato (terra de subsolo), com uma planta. O solo utilizado apresentou as seguintes propriedades químicas: pH em água: 5,5 ;K: 8,30 mg.dm⁻³ ; P: 0,17 mg.dm⁻³; Ca: 0,52 cmol_c.dm⁻³; Mg: 0,10 cmol_c.dm⁻³; Al: 0,00 cmol_c.dm⁻³; H+Al: 1,24 cmol_c.dm⁻³; SB: 0,64 cmol_c.dm⁻³; t: 0,64 cmol_c.dm⁻³; T: 1,88 cmol_c.dm⁻³; V: 34,11% ; m: 0,00 %; M.O: 0,28 dag.kg⁻¹; P-rem: 4,44 mg.l⁻¹; Zn: 0,34 mg.dm⁻³; Fe: 17,35 mg.dm⁻³; Mn: 1,29 mg.dm⁻³; Cu: 0,60 mg.dm⁻³; B: 0,04 mg.dm⁻³; S: 20,05 mg.dm⁻³. Quanto à textura, o solo apresentou 54% de argila, 13% de silte e 33% de areia, denominado tipo 3 argiloso. Foi feita a correção do solo, por meio da calagem para atingir uma saturação por bases de 70%, utilizando-se calcário com PRNT de 85%. O solo contido nos vasos foi molhado e permaneceram por 21 dias em período de incubação, para reação do calcário. Foram conduzidos três experimentos, cada um com a variação de um dos macronutrientes primários. No primeiro experimento avaliaram-se quatro doses de N, a fonte do nutriente utilizada foi a ureia, fornecendo o recomendado para a cultura de P e K, no segundo experimento avaliaram-se quatro doses de P, a fonte do nutriente utilizada foi o superfosfato triplo, fornecendo o recomendado para a cultura de N e K e, no terceiro, avaliaram-se quatro doses de K, a fonte do nutriente utilizada foi o cloreto de potássio, fornecendo as doses de N e P conforme o recomendado para a cultura. O fornecimento do N e K foi feito em 3 parcelamentos, o primeiro parcelamento no dia da implantação do experimento no começo do mês de janeiro, e os outros 2 parcelamentos 30 dias após a última aplicação, o P foi fornecido em uma única aplicação, no dia da implantação do experimento.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4 x 4, sendo três cultivares de café arábica (Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2), quatro doses do fertilizante estudado (0, 50, 100 e 150% da dose recomendada), e quatro repetições, sendo que as parcelas foram constituídas de um vaso com uma planta por vaso.

3.1 Avaliações realizadas

Foram feitas avaliações para as características: alturas das plantas, diâmetros do colo e índice de área foliar em cm² e acúmulo dos nutrientes na matéria seca das folhas. Para essas

características foram feitas quatro avaliações de 2 em 2 meses, sendo a primeira feita no final do mês de março de 2018 e a última feita no final de dezembro de 2018. As avaliações foram realizadas da seguinte maneira:

- a) Altura da planta: por meio da medição da altura das plantas (cm), utilizando uma régua graduada, medindo da superfície do solo até o meristema apical. Estabeleceu-se como parâmetro a ser analisado, estatisticamente, a diferença obtida entre a última e a primeira avaliação feita.
- b) Diâmetro do caule: por meio da medição do diâmetro das plantas (mm) na altura do colo, utilizando um paquímetro digital. Estabeleceu-se como parâmetro a ser analisado, estatisticamente, a diferença obtida entre a última e a primeira avaliação feita.
- c) Área Foliar: a estimativa da área foliar foi feita pelo método de Barros *et al.* (1973), que se baseia nas dimensões do retângulo circunscrito aos limbos foliares, ajustados pela equação $Y = 0,667 X$, em que: Y representa a área foliar e X, a área do retângulo circunscrito ao limbo foliar, obtida pelo produto entre o maior comprimento e a maior largura da folha.
- d) Teor dos nutrientes nas folhas: Ao final do experimento as plantas foram retiradas dos vasos e, a parte aérea foi separada das raízes, as folhas foram retiradas e colocadas em sacos de papel, em seguida, foram secadas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até peso constante, pesado e triturado em moinho tipo Wiley, do extrato obtido por digestão nitroperclórica foram determinados os teores de fósforo por colorimetria, de potássio por fotometria de chama. O teor de nitrogênio total foi obtido pelo método semimicro Kjeldahl (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

3.2 Análises estatísticas

3.2.1 Análise de variância, regressão e estudo das médias

Para este procedimento estatístico, foi realizado uma análise para cada experimento utilizando os ganhos em altura, em diâmetro, em área foliar e teor dos nutrientes nas folhas como variáveis respostas.

Aos dados obtidos em cada experimento, foi ajustado o seguinte modelo linear:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

sendo:

y_{ijk} : variável resposta observada na parcela que recebeu o i -ésimo nível de cultivar, j -ésimo nível do nutriente na k -ésima repetição;

μ : uma constante inerente a todas as parcelas experimentais;

α_i : efeito fixo da i -ésima cultivar, sendo $i = 1, 2$ e 3 ;

β_j : efeito fixo da j -ésima dose do nutriente (N, P ou K), sendo $j = 1, 2, 3$ e 4 .

$(\alpha\beta)_{ij}$: efeito da interação entre os níveis de cultivar e nutrientes.

ε_{ijk} : erro aleatório, independente com distribuição $N(0, \sigma^2)$

Realizou-se a análise de variância, conforme o modelo descrito anteriormente, sendo as hipóteses de interesse testadas por meio do teste F, sendo considerados os efeitos significativos aqueles com p -valor $\leq 0,05$. Para as variáveis respostas que apresentaram efeito da interação entre cultivar e nutriente, realizou-se o desdobramento de nutriente dentro de cada nível de cultivar, sendo ajustados modelos de regressão polinomiais para descrever a relação entre as doses do nutriente, cultivares e a variável resposta. Para as variáveis respostas que apresentaram apenas efeito de nutrientes, foram ajustados modelos de regressão polinomiais para descrever a relação entre as doses do nutriente e a variável resposta. Para as que apresentaram apenas de cultivar, o estudo de médias foi realizado, por meio do critério de agrupamento de Scott e Knott (1974), a 5% de probabilidade.

3.2.2 Curva de crescimento

A fim de descrever o crescimento em altura, diâmetro de caule e área foliar foi ajustado os seguintes modelos de regressão não linear mistos:

Modelo Logístico, conforme Pinheiro e Bates (2009):

$$y_{ijk} = \frac{\beta_{1i} + b_{1k}}{1 + \exp\left[\frac{\beta_{2i} - t_{ij}}{\beta_{3i}}\right]} + \varepsilon_{ijk}$$

em que:

y_{ijk} : é o valor observado da variável resposta obtida na k -ésima parcela no j -ésimo tempo para i -ésimo tratamento (cultivar:dose);

β_{1i} : representa a assíntota de crescimento para a variável resposta para o i-ésimo tratamento, tendendo para o valor máximo quando o tempo tende para o infinito;

b_{1k} : representa o efeito aleatório do crescimento assintótico para a k-ésima parcela, independentes e identicamente distribuídos $N(0, \sigma^2)$

β_{2i} : é o tempo no qual a planta atinge a metade do valor da variável resposta assintótica para o i-ésimo tratamento (inflexão);

β_{3i} : é o tempo decorrido entre a planta alcançar a metade e, aproximadamente, $\frac{3}{4}$ do seu crescimento assintótico para o i-ésimo tratamento.

ε_{ijk} : é o erro aleatório associado a cada parcela, independente e identicamente distribuídos $N(0, \sigma^2)$

Modelo Gompertz, conforme Pinheiro e Bates (2009):

$$y_{ijk} = (\beta_{1i} + b_{1k}) \exp \left[-\beta_{2i} \beta_{3i}^{t_{ij}} \right] + \varepsilon_{ijk}$$

em que:

y_{ijk} : é o valor observado da variável resposta obtida na k-ésima parcela no j-ésimo tempo para i-ésimo tratamento (cultivar:dose);

β_{1i} : representa a assíntota de crescimento para a variável resposta para o i-ésimo tratamento, tendendo para o valor máximo quando o tempo tende para o infinito;

b_{1k} : representa o efeito aleatório do crescimento assintótico para a k-ésima parcela, independentes e identicamente distribuídos $N(0, \sigma^2)$;

β_{2i} : é o parâmetro numérico relacionado ao valor da função, para o i-ésimo tratamento, quando o tempo tende a zero ($t = 0$);

β_{3i} : é o parâmetro numérico para a escala no eixo do tempo t para o i-ésimo tratamento;

ε_{ijk} : é o erro aleatório associado a cada parcela, independentes e identicamente distribuídos $N(0, \sigma^2)$.

Todas as análises foram realizadas com a utilização do software R, sendo a análise de variância, por meio da biblioteca ExpDes (e o ajuste dos modelos não lineares mistos foi feito, utilizando-se o pacote nlme (*non linear mixed effects models*) (BATES *et al.*, 2020). A escolha do modelo foi realizada, com base nos critérios de AIC e BIC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fase inicial de desenvolvimento de cafeeiros é o período mais sensível das plantas, pois há grande acúmulo de matéria seca fazendo com que as curvas de absorção de nutrientes sejam diferentes em relação à fase reprodutiva, com aumento das concentrações de macronutrientes primários (ASSAD *et al.*, 2004; CAMARGO; CAMARGO, 2001; CARVALHO *et al.*, 2010).

4.1 Ganho em altura, diâmetro de caule e teor de nitrogênio foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Nitrogênio

Na Tabela 1, é apresentado o resumo da análise de variância para o ganho em altura (cm) com a variação da dose de N, mantidas as doses padrão de P₂O₅ e K₂O, onde se pode notar a interação significativa de cultivares e doses de N indicando haver variação na exigência nutricional em relação ao nitrogênio.

Tabela 1 - Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de N, aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	210,1	105,1	10,9	0,0001
dose	3	2031	677,1	70,24	0,0000
cultivar: dose	6	264,7	44,11	4,576	0,0015
Resíduos	36	347	9,639		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 14.27 %

Pode-se observar também pela Tabela 2 que as três cultivares avaliadas responderam às doses de N, sendo possível a comparação do comportamento em ganho em altura entre elas.

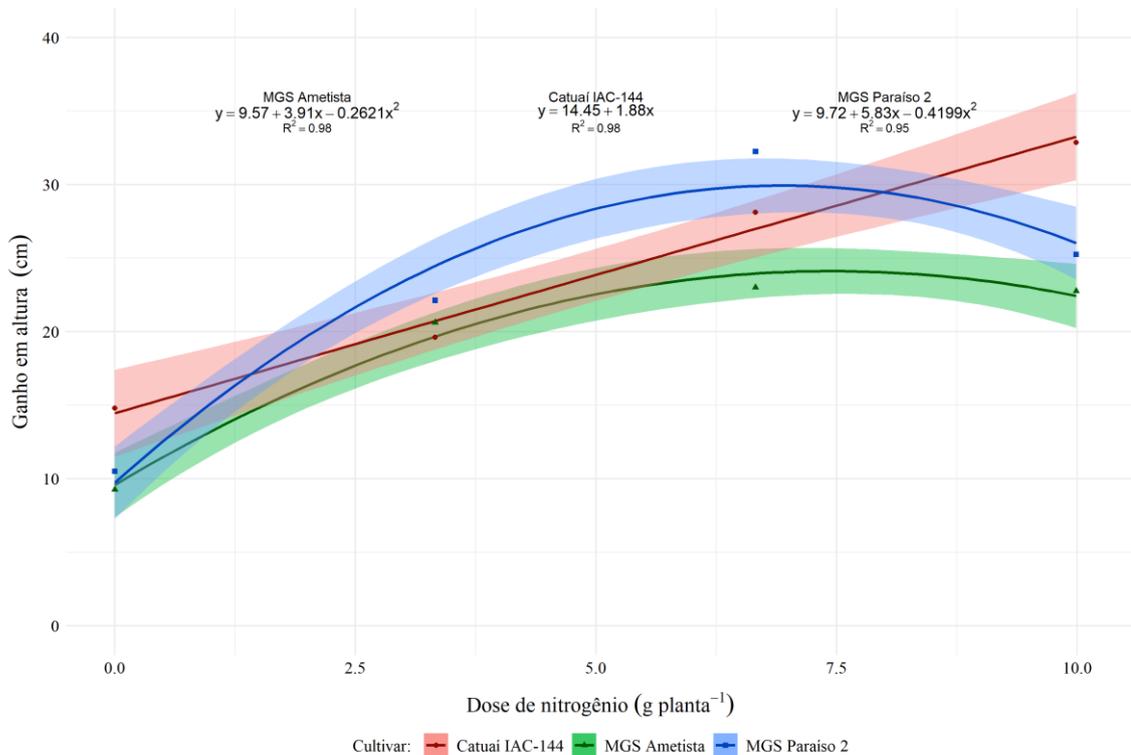
Tabela 2 - Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no ganho em altura das plantas.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	210,1	105,1	10,9	0,0001
cultivar: dose	9	2296	255,1	26,46	0,0000
cultivar: dose: Ametista	3	510,9	170,3	17,67	0,0000
cultivar: dose: Catuaí	3	797,9	266	27,59	0,0000
cultivar: dose: Paraíso	3	987	329	34,13	0,0000
Resíduos	36	347	9,639		

Fonte: Do autor (2020).

As diferenças percebidas, na Tabela 3, podem ser melhor visualizadas, na Figura 1, com o estudo de regressão referente ao ganho em altura das diferentes cultivares.

Figura 1 - Ganho em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66, e 9.99 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

Percebe-se que quando se forneceu nitrogênio para as plantas, entre as doses 0 e cerca de 3 g planta⁻¹ de N, não houve diferença significativa de ganho em altura entre as três cultivares. Porém, entre as doses de aproximadamente 3 a 6 g planta⁻¹ de N, a cultivar paraíso foi mais eficiente no aproveitamento do N aplicado (em relação às demais) com maior ganho em altura, mostrando comportamento quadrático. A partir dessa dose próxima de 6 g planta⁻¹ de N, até cerca de 9 g planta⁻¹ de N, o ganho em altura das plantas foi semelhante entre as cultivares MGS Paraíso 2 e Catuaí Vermelho IAC 144, porém superiores ao ganho em altura das plantas da cultivar MGS Ametista. A partir dessa dose (cerca de 9 g planta⁻¹ de N) a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 passa a responder mais às doses de nitrogênio. Dessa forma, pode-se inferir que com exceção a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, as demais cultivares têm um comportamento quadrático, sendo a MGS Paraíso 2, mais responsiva às doses de nitrogênio (FIGURA 1) a partir de 3 g planta⁻¹ de N.

Já a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, apresentou um crescimento (ganho em altura) linear crescente, à medida que se aumentaram as doses de nitrogênio, com ganhos superiores às demais, em maiores doses de N (FIGURA 1). Na dose zero g a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 teve um ganho em altura de 14,45cm, chegando a maior dose com ganho em altura de cerca de 25cm, ou seja, apresentou ganho em altura de cerca de 1,06cm para cada grama de nitrogênio aplicada. Assim, a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 teve seu maior ganho em altura na maior dose de N testada (9.99g planta⁻¹ de N) podendo ser maior (fora do intervalo estudado).

O maior ganho em altura da cultivar MGS Paraíso 2 foi com a dose de 6.94g planta⁻¹ de N, alcançando ganho em altura de 29,96cm, chama à atenção essa necessidade nutricional distinta da cultivar MGS Paraíso 2, com maior ganho em altura (29,96 cm) na dose de 6.94g planta⁻¹ de N. Outro fato interessante é que em doses maiores que 6.94g as plantas da cultivar MGS Paraíso 2 podem ter menor ganho em altura.

Fato semelhante ocorre com a cultivar MGS Ametista, que tem seu ponto de máximo ganho em altura na dose de 7.45g planta⁻¹, porém alcançando menores ganhos em altura (24,15cm), o que pode ser característica genética da cultivar.

Na Tabela 3, é apresentada a análise de variância para o ganho em diâmetro de caule das plantas com a variação da dose de N, onde se pode notar que não houve interação significativa de cultivares e doses de N, nem entre cultivares tratadas com as diferentes doses. Porém, pode-se notar o efeito das doses de N aplicadas, independentemente, da cultivar testada.

Tabela 3 - Análise de variância para ganho em diâmetro de caule sob diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

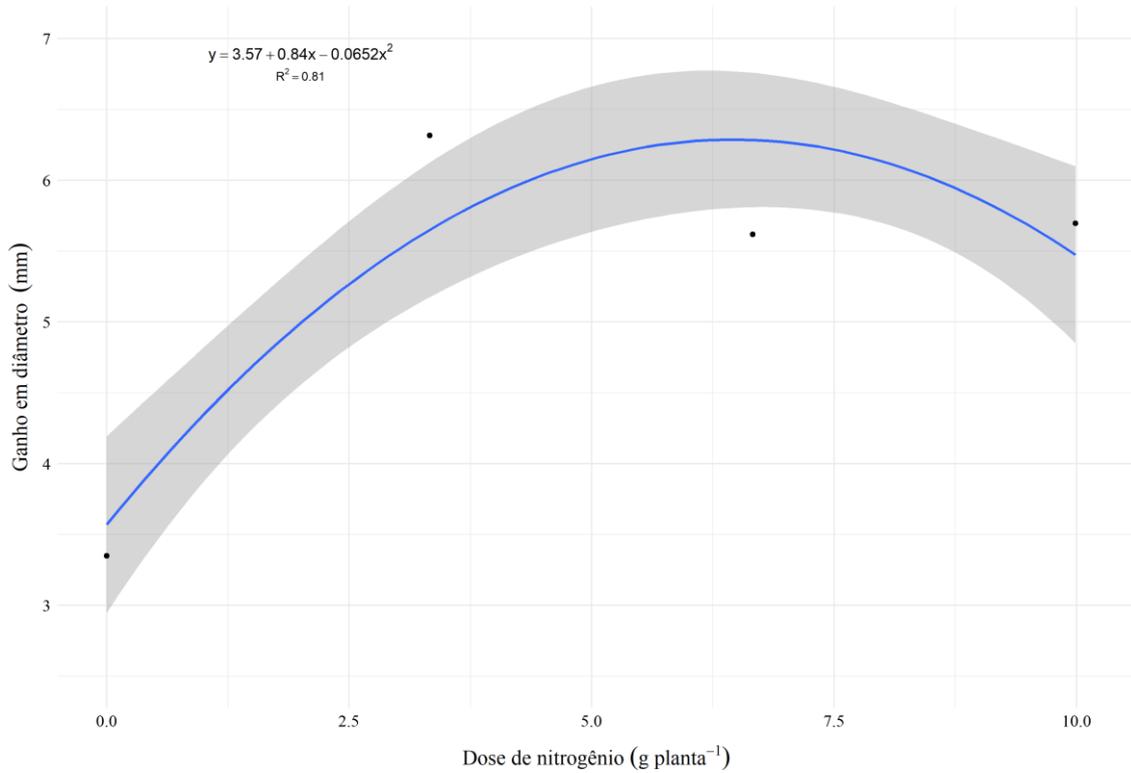
FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	3,55	1,775	1,067	0,3548
dose	3	61,07	20,36	12,23	0,0000
cultivar: dose	6	3,074	0,5124	0,3079	0,9287
Resíduos	36	59,91	1,664		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 24.6 %

De acordo com a Figura 2, as doses de nitrogênio promoveram um comportamento quadrático no diâmetro de caule das plantas, à medida que se aumentavam as doses de N.

Figura 2 - Ganho médio em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, portanto, pela Figura 2, que o ganho em diâmetro das plantas aumentam, atingindo o ponto máximo na dose de 6.44g planta⁻¹ de N, dose muito próxima a 6.94g planta⁻¹ de N, que foi a dose que promoveu o maior ganho em altura da cultivar (MGS Paraíso 2), com diâmetro de 6,27 mm. A partir da dose 6.44g planta⁻¹ de N os ganhos em diâmetro de caule começam a diminuir, evidenciando que o excesso de N pode provocar o estiolamento das plantas, fato descrito por Malavolta *et al.* (1993).

Na Tabela 4, é encontrada a análise de variância para o teor de nitrogênio nas folhas das plantas com a variação da dose de N, onde se pode notar que não houve interação significativa de cultivares e doses de N, porém houve efeito significativo para cultivares e também para doses de N.

Tabela 4 - Análise de variância do teor de nitrogênio encontrado nas folhas das plantas submetidas à diferentes doses de N, aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-valor
cultivar	2	0,4251	0,2126	4,241	0,0221
dose	3	7,324	2,441	48,71	0,000
cultivar: dose	6	0,2997	0,04995	0,9966	0,4425
Resíduos	36	1,804	0,05012		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 9.36 %

Tabela 5 - Teor médio de Nitrogênio encontrado nas folhas das plantas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

Cultivar	Teor de Nitrogênio (dag.kg ⁻¹)
Catuaí IAC-144	2,52 A
MGS Ametista	2,37 B
MGS Paraíso 2	2,29 B

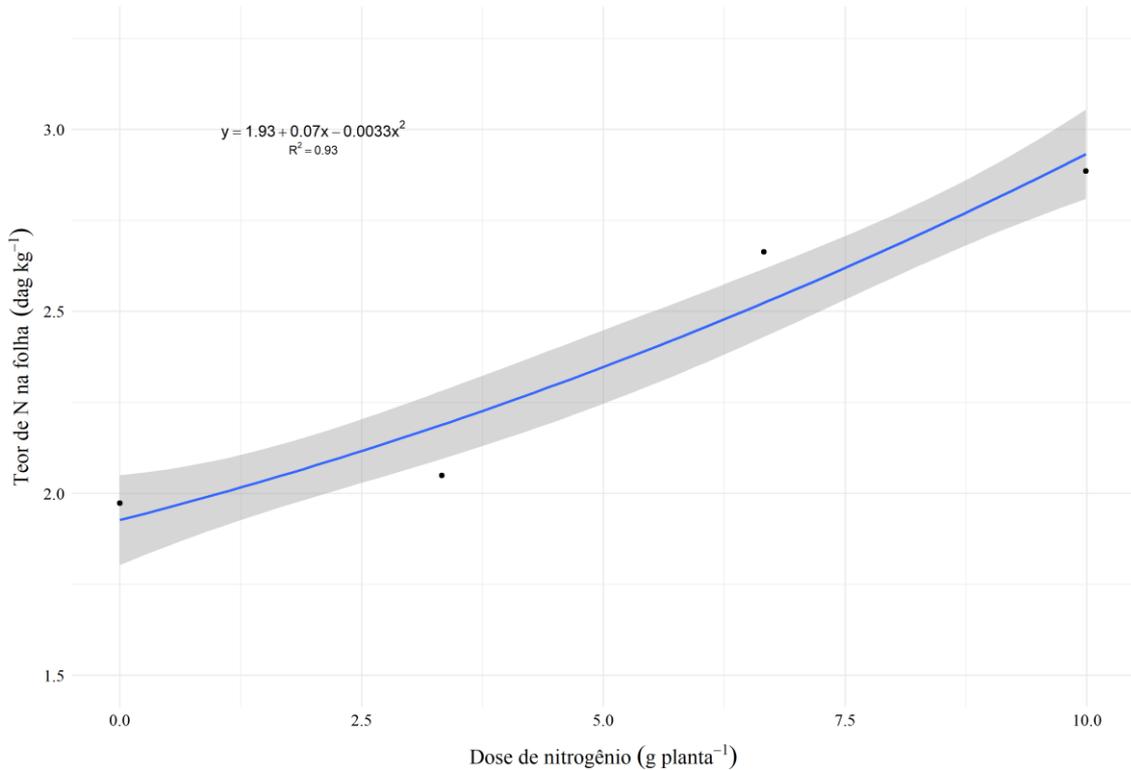
Fonte: Do autor (2020).

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

De acordo com teste de médias apresentado, pode se notar que a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 foi superior no teor de Nitrogênio encontrado nas folhas, em relação às demais cultivares avaliadas. As cultivares MGS Ametista e MGS Paraíso 2 não apresentaram diferenças para essa característica avaliada (TABELA 5).

De acordo com a Figura 3, percebe-se que, independentemente, da cultivar testada, as doses de nitrogênio promoveram um comportamento linear no teor foliar de N das plantas, à medida que se aumentavam as doses de N.

Figura 3 - Teor de Nitrogênio nas folhas das cultivares, Catuaí IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de Nitrogênio, (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, portanto, pela Figura 3, que o ganho em teores foliares de N das plantas, teve comportamento quadrático crescente com ponto de mínimo teor na dose 0g planta⁻¹ de N aplicada (1,93 dag.kg⁻¹) e máximo na dose de 9.99g planta⁻¹ de N, com teor foliar do nutriente de 2,63 dag.kg⁻¹. Esse resultado era esperado, pois com o aumento do fornecimento de N, maior também é o acúmulo do nutriente na matéria seca das plantas. Nos trabalhos de Clemente *et al.* (2008), Pinto *et al.* (2013) e Vilela (2020) foram encontrados teores que variaram de 1,92 a 3,48 dag.kg⁻¹ de N nas folhas de plantas de café, no primeiro ano pós- plantio, ou seja, o valor de 2,63 dag.kg⁻¹ está dentro do considerado ideal para plantas com um ano após o transplantio para o campo. Levando-se em consideração que a cultivar MGS Paraíso 2 é mais responsiva e mais eficiente no aproveitamento de N aplicado, pois na dose 6.44g planta⁻¹, confere um teor foliar de cerca de 2,4 dag.kg⁻¹ (FIGURA 3), que pode ser considerado o teor ideal, por proporcionar maior ganho em altura e diâmetro de caule (FIGURA 1 e 2).

4.2 Ganho em altura, diâmetro de caule, área foliar, e teor de fósforo foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Fósforo

Na Tabela 6, é apresentada a análise de variância para o ganho em altura (cm) com a variação da dose de fósforo, onde se pode notar a interação significativa de cultivares e doses de P_2O_5 , ou seja, as cultivares responderam de forma diferente as doses testadas, mostrando variação nas necessidades nutricionais em relação ao fósforo.

Tabela 6 - Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	126,9	63,45	11,66	0,0001
dose	3	88,51	29,5	5,422	0,0037
cultivar: dose	6	161,9	26,98	4,958	0,0009
Resíduos	34	185	5,441		

CV = 9.22 %

Fonte: Do autor (2020).

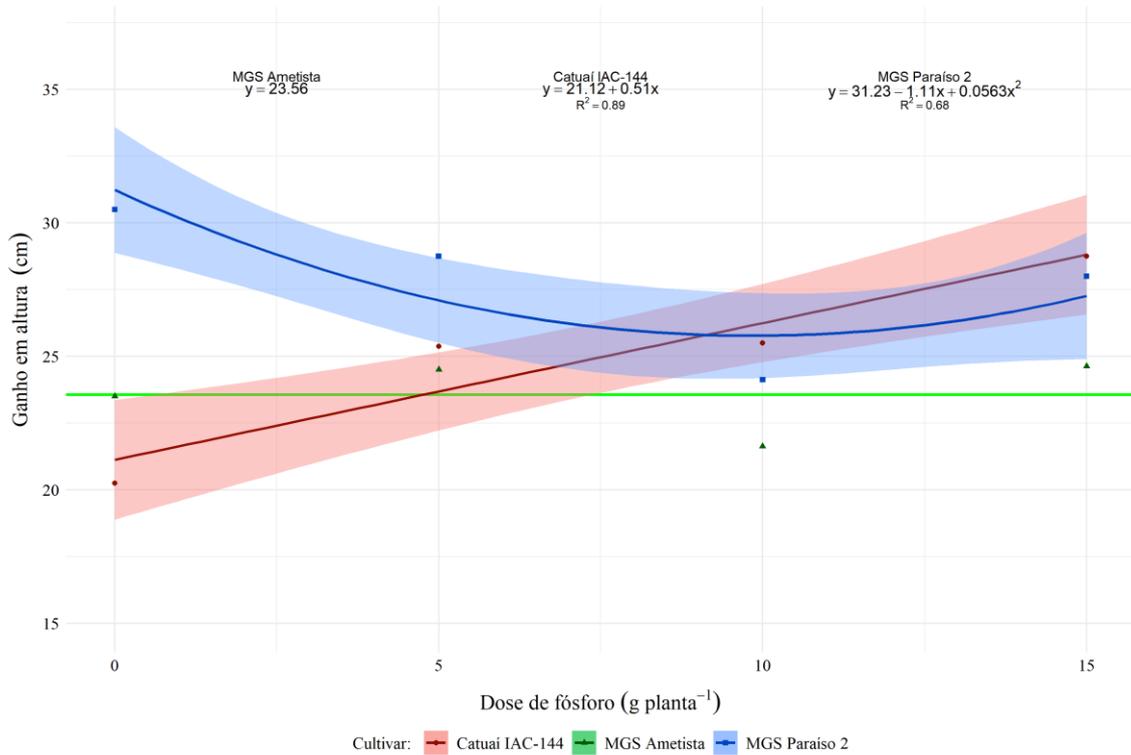
Pode-se observar também, pela Tabela 7, que as três cultivares avaliadas, responderam às doses de P_2O_5 , sendo possível a comparação do comportamento de ganho em altura entre elas.

Tabela 7 - Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no ganho em altura.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	126,9	63,45	11,66	0,0001
cultivar: dose	9	250,4	27,82	5,113	0,0002
cultivar: dose: Ametista	3	23,06	7,688	1,413	0,2559
cultivar: dose: Catuaí	3	148	49,35	9,07	0,0001
cultivar: dose: Paraíso	3	79,28	26,43	4,857	0,0064
Resíduos	34	185	5,441		

Fonte: Do autor (2020).

Figura 4 - Ganho em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P_2O_5 (0, 5, 10 e 15 $g\ planta^{-1}$).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, pela Figura 4, que houve variação no ganho em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e MGS Paraíso 2, quando submetidas a diferentes doses de P_2O_5 . Porém, não houve variação no ganho em altura da cultivar MGS Ametista, quando submetidas às doses de 0, 5, 10 e 15 $g\ planta^{-1}$ de P_2O_5 .

A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, apresentou comportamento linear crescente para a característica testada, quando recebeu as doses crescentes de P_2O_5 , saindo de 21,12cm quando não se aplicou P_2O_5 (dose 0 $g\ planta^{-1}$) e chegando a um ganho em altura de 28,77 cm na dose 15 $g\ planta^{-1}$, ou seja, as plantas tiveram ganhos em altura de 0,51 cm para cada grama de P_2O_5 aplicada.

A cultivar MGS Paraíso 2 teve um comportamento diferente das demais, mostrando um maior ganho em altura de plantas (31,23cm) na dose 0 $g\ planta^{-1}$ de P_2O_5 , e a partir daí com um comportamento quadrático chegando a um ganho em altura de 27,24cm na dose de 15 $g\ planta^{-1}$ (diminuição de 3,99cm no ganho em altura). Infere-se, portanto, que maiores doses de P_2O_5 na formação de lavouras da cultivar MGS Paraíso 2 pode levar a plantas com menores ganhos em altura, resultados semelhantes foram encontrados por Melo *et al.* (2006), que trabalhando em casa de vegetação com mudas de cafeeiro em tubetes sob diferentes substratos,

fontes e doses de P_2O_5 , observaram diminuição no ganho em altura dos cafeeiros em função do aumento nas doses. Clemente *et al.* (2008), em trabalho com faixas críticas de macronutrientes em vasos em pós-plantio e primeiro ano com a cultivar Topázio MG 1190, encontraram para a característica altura de plantas de cafeeiro o mesmo comportamento encontrado, neste trabalho, ou seja, o ganho em altura das plantas foi menor quando se aumentaram as doses de P_2O_5 .

O menor ganho em altura pode ser explicado pelo fato de que, elevados teores foliares de N e P podem proporcionar redução da absorção de B e induzirem a deficiência de Cu (CANTARELLA, 2007; CARVALHO *et al.*, 2010), e também que pode ocorrer o antagonismo entre P e Zn, quando o fósforo excede o nível crítico, possivelmente, em decorrência do P prejudicar a absorção e translocação do Zn nas plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Na Tabela 8, é encontrada a análise de variância para o ganho em diâmetro de caule das plantas, com a variação nas doses de P_2O_5 , onde se pode notar que não houve interação significativa de cultivares e doses de P_2O_5 , nem entre cultivares tratadas com as diferentes doses. Porém, pode-se notar o efeito das doses de P_2O_5 aplicadas, independentemente, cultivar testada.

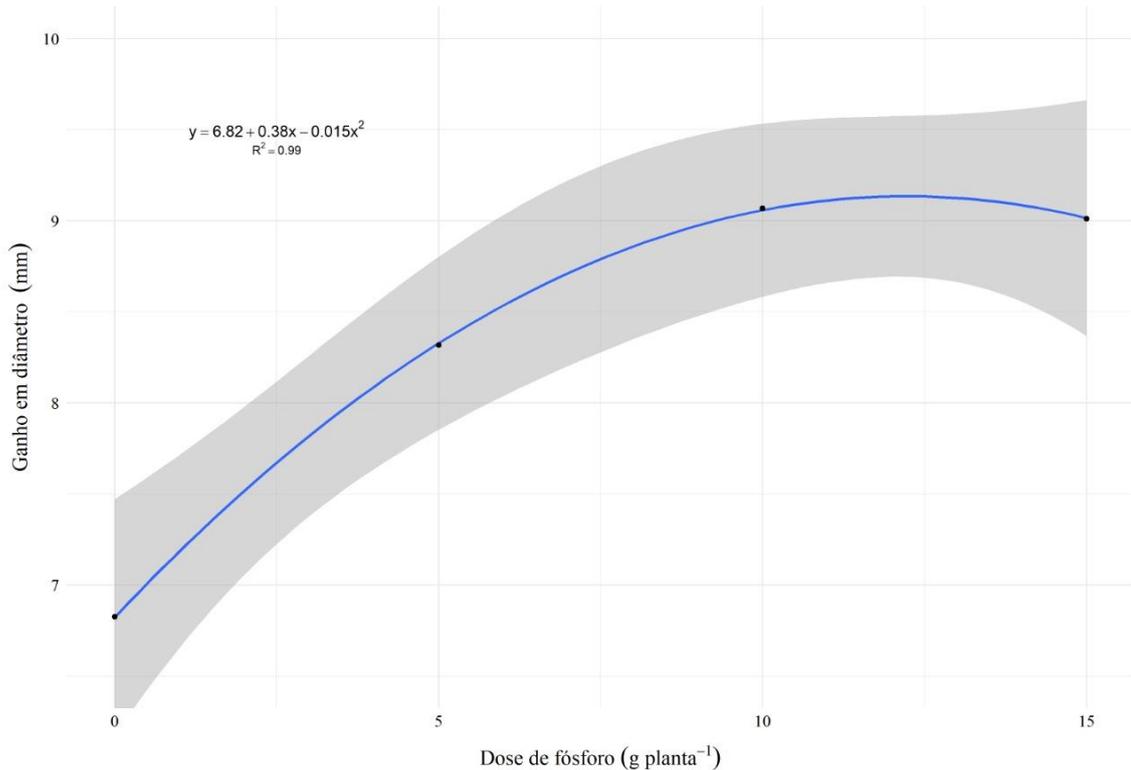
Tabela 8 - Análise de variância para o ganho em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 com a variação da dose de P_2O_5 .

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	1,113	0,5565	0,3242	0,7252
dose	3	38,24	12,75	7,426	0,0005
cultivar: dose	6	11,79	1,964	1,144	0,3572
Resíduos	36	61,79	1,717		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 15.74 %

Figura 5 - Ganho em diâmetro do caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista submetidas a 4 doses de P_2O_5 , (0, 5, 10 e 15 $g\ planta^{-1}$).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, pela Figura 5, que o ganho em diâmetro de caule das plantas, aumenta, a partir da dose 0g (6,86mm), atingindo o ponto de máxima na dose de cerca de $12,66g\ planta^{-1}$ de P_2O_5 , com ganho em diâmetro de cerca de 9,22mm, depois cai até um ganho em diâmetro de cerca de 9,14mm na dose de 15 $g\ planta^{-1}$. Resultado semelhante ao deste trabalho foi encontrado por Vilela (2020) que desde a dose 0g de P_2O_5 os diâmetros de caule diminuíram, à medida que se aumentavam as doses de fósforo, durante o primeiro ano após a implantação em campo.

Portanto, com base no ganho em diâmetro de caule, não foi possível detectar diferenças significativas entre as cultivares testadas, porém a dose ideal de P_2O_5 para as três cultivares na fase de formação foi de $12,66g\ planta^{-1}$, e que doses superiores a esta podem proporcionar menores ganhos em diâmetro de caule das plantas.

Assim, como na altura, a diminuição nos ganhos em diâmetro de caule, também pode ser explicada, pelo fato de que elevados teores foliares de N e P podem proporcionar redução da absorção de B e induzirem a deficiência de Cu (CANTARELLA, 2007; CARVALHO *et al.*, 2010), e também que pode ocorrer o antagonismo entre P e Zn, quando o fósforo excede o nível crítico, possivelmente, em razão de o P prejudicar a absorção e translocação do Zn nas plantas (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Na Tabela 9, é apresentada a análise de variância para o ganho em área foliar das plantas com a variação da dose de P_2O_5 , onde se pode notar que não houve interação significativa de cultivares e doses, porém houve efeito significativo para doses e cultivares.

Tabela 9 - Análise de variância para área foliar de plantas, submetidas à diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	2010691	1005346	5,493	0,0082
dose	3	2226858	742286	4,056	0,0139
cultivar: dose	6	349401	58234	0,3182	0,9232
Resíduos	36	6588687	183019		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 24.7 %

As cultivares MGS Ametista e MGS Paraíso 2, não apresentaram diferenças entre si, porém foram superiores a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, mostrando uma maior área foliar, quando submetidas às doses testadas de P_2O_5 (TABELA 10).

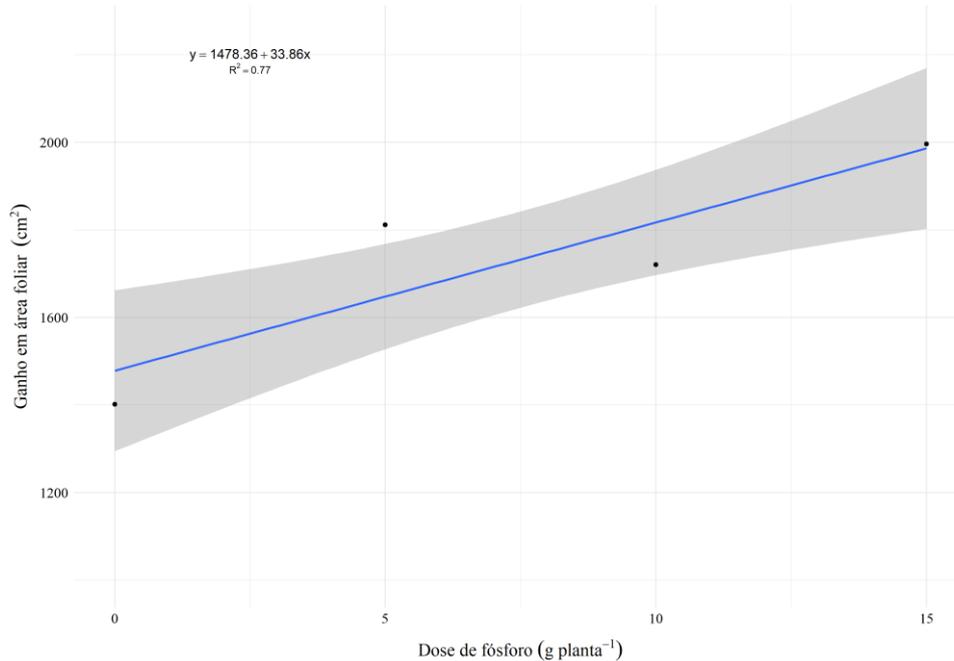
Tabela 10 - Área foliar média das plantas das cultivares Catuaí IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

Cultivar	Teor de Nitrogênio (dag.kg ⁻¹)
MGS Ametista	1959,31 A
MGS Paraíso 2	1774,35 A
Catuaí IAC-144	1463,29 B

Fonte: Do autor (2020).

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

Figura 6 - Ganho em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P_2O_5 (0, 5, 10, e 15 $g\ planta^{-1}$).



Fonte: Do autor (2020).

O gráfico para o ganho em área foliar em relação às doses de P_2O_5 , mostra que as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2, apresentam comportamento linear para essa característica avaliada, mostrando que, quanto maior a dose de P_2O_5 , maior o ganho em área foliar. Na dose 0g, foi constatado ganho de área foliar de $1478,36cm^2$ e na dose máxima testada ($15g\ planta^{-1}$), ganho de área foliar de $1986,26cm^2$, ou seja, houve um ganho em área foliar de $33,86cm^2$ a cada grama de fósforo aplicada.

Na Tabela 11, é encontrada a análise de variância para o teor foliar de fósforo ($dag.kg^{-1}$) com a variação da dose de P_2O_5 , onde se pode notar a interação significativa de cultivares e doses, ou seja, as cultivares responderam de forma diferente às doses testadas, indicando variação nas necessidades nutricionais com relação ao fósforo.

Tabela 11 - Análise de variância para o teor de fósforo nas folhas das plantas sob diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	0,0006792	0,0003396	0,5557	0,5785
dose	3	0,03135	0,01045	17,1	0,0000
cultivar: dose	6	0,008837	0,001473	2,41	0,0463
Resíduos	36	0,022	0,0006111		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 12.16 %

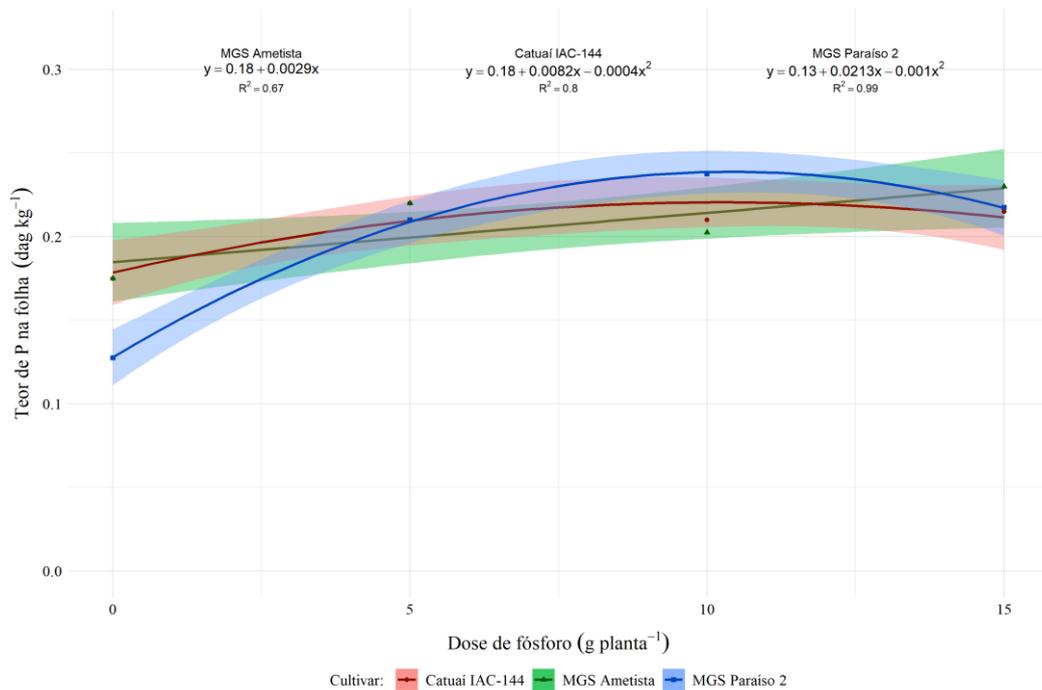
Pode-se observar também, pela Tabela 12, que as três cultivares avaliadas, responderam às doses de P_2O_5 , sendo possível a comparação do comportamento do teor de fósforo nas folhas.

Tabela 12 - Análise de variância do desdobramento do efeito de diferentes doses de P_2O_5 , aplicadas às cultivares Catuaí Vermelho IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2 no teor de fósforo nas folhas.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	0,0006792	0,0003396	0,5557	0,5785
cultivar: dose	9	0,04019	0,004465	7,307	0,0000
cultivar: dose: Ametista	3	0,006969	0,002323	3,801	0,0182
cultivar: dose: Catuaí	3	0,005	0,001667	2,727	0,0582
cultivar: dose: Paraíso	3	0,02822	0,009406	15,39	0,0000
Resíduos	36	0,022	0,0006111		

Fonte: Do autor (2020).

Figura 7 - Teor de fósforo nas folhas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P_2O_5 (0, 5, 10, e 15 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, pela Figura 7, que o teor de fosforo nas folhas, em relação às doses de P_2O_5 , que somente na dose 0g houve superioridade das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e a MGS Ametista, em relação a cultivar MGS Paraíso 2, e nas demais doses as 3 cultivares não apresentaram diferenças significativas entre si.

4.3 Ganho em altura, diâmetro de caule e teor de potássio foliar, para as cultivares submetidas a diferentes doses de Potássio

Na Tabela 13, é encontrada a análise de variância para o ganho em altura (cm) com a variação de doses de K_2O , onde se pode notar a interação significativa de doses, ou seja, as cultivares responderam de forma diferente às diferentes doses, havendo diferenças nas necessidades nutricionais, com relação ao potássio, independente das cultivares testadas.

Tabela 13 - Análise de variância para ganho em altura sob diferentes doses de K_2O , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

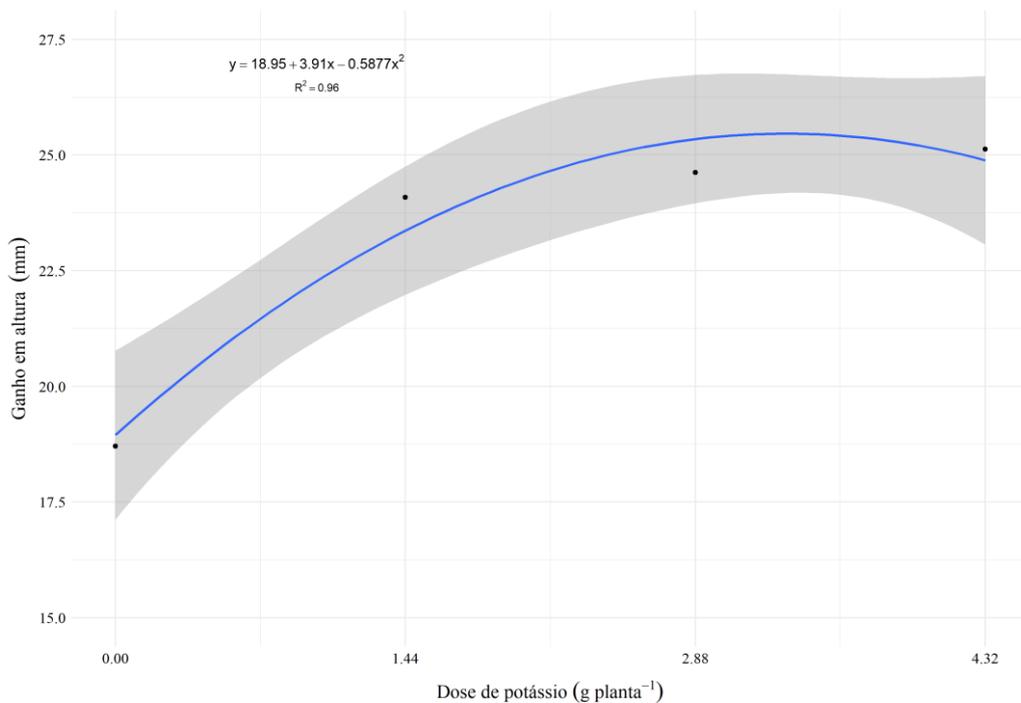
FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	22,2	11,1	0,6832	0,5114
dose	3	320,1	106,7	6,568	0,0011
cultivar: dose	6	49,26	8,21	0,5054	0,8001
Residual	36	584,8	16,24		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 17.42 %

Percebe-se, pela Figura 8, que, independentemente, da cultivar testada, as doses de potássio promoveram um comportamento quadrático, no ganho em altura das plantas.

Figura 8 - Ganho em altura de plantas, das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K_2O (0, 1.44, 2.88, e 4.32 $g\ planta^{-1}$).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, portanto, pela Figura 8, que o ganho em altura de plantas aumenta atingindo o ponto de máxima na dose de 3.32g planta⁻¹ de K₂O, com altura de 25,45cm, e que, a partir da dose de 3.32g os ganhos em altura começam a diminuir, evidenciando que o excesso de K₂O pode prejudicar essa característica avaliada. O excesso de K, no solo, reduz a absorção de outros nutrientes como Ca e Mg, pelo efeito da ‘inibição competitiva’, além de exercer influência na absorção de Fe (CARVALHO *et al.*, 2010; ERNANI *et al.*, 2007).

Na Tabela 14, é encontrada a análise de variância para o ganho em diâmetro do caule (mm) com a variação da dose de K₂O, onde se pode notar o efeito significativo de doses de K₂O, independente da cultivar utilizada.

Tabela 14 - Análise de variância para ganho em diâmetro de caule sob diferentes doses de K₂O, aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

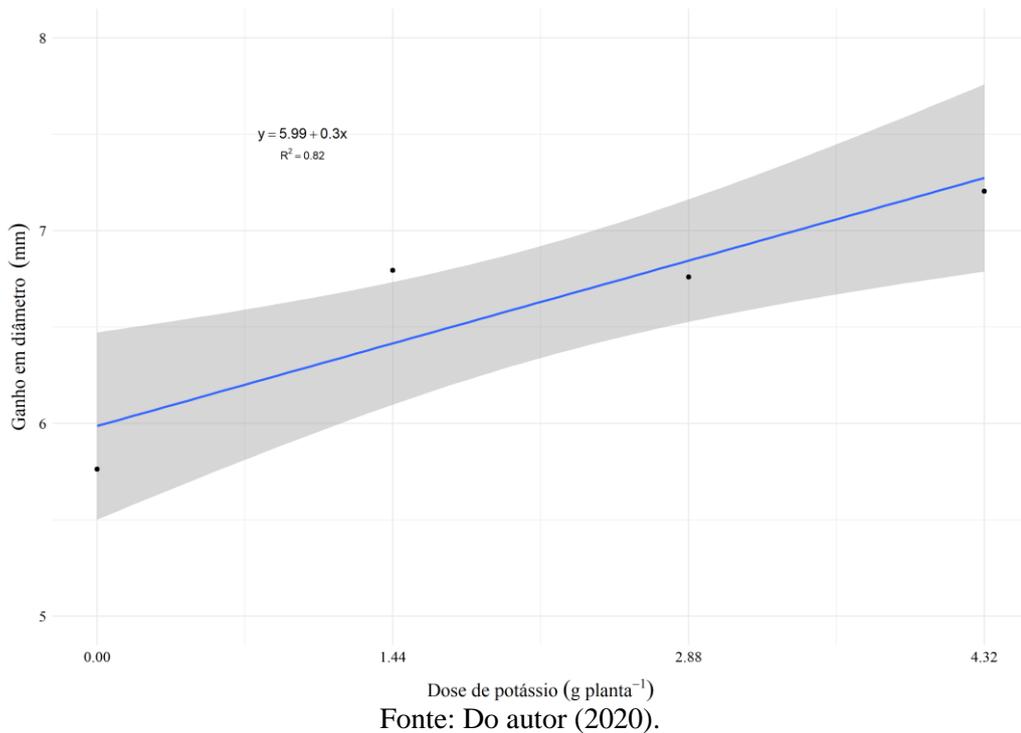
FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	1,957	0,9783	0,7738	0,4688
dose	3	13,51	4,503	3,561	0,0235
cultivar: dose	6	16,05	2,676	2,116	0,0753
Residual	36	45,51	1,264		

Fonte: Do autor (2020).

CV = 16.96 %

Nota-se pela Figura 9 que as plantas apresentaram um comportamento linear crescente independentemente da cultivar utilizada.

Figura 9 - Ganho em diâmetro de caule das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K_2O (0, 1.44, 2.88, e 4.32 g planta⁻¹).



Percebe-se que, na dose zero de K_2O , o ganho em diâmetro de caule das plantas (independente da cultivar utilizada) foi de 5,99mm, chegando à máxima dose (4,32g planta⁻¹) com um ganho em diâmetro de 7,29mm, ou seja, houve um ganho em diâmetro de 0,3mm das plantas a cada grama de K_2O aplicadas.

Na Tabela 15, é encontrada a análise de variância para o teor de potássio, nas folhas das plantas com a variação da dose de K_2O . Observou-se efeito significativo para cultivares e doses, sem efeito significativo para a interação entre os fatores.

Tabela 15 - Análise de variância para o teor de potássio nas folhas das plantas sob diferentes doses de K_2O , aplicadas as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

FV	GL	SQ	QM	F	p-Valor
cultivar	2	0,9353	0,4677	6,706	0,0033
dose	3	26,8	8,934	128,1	0,0000
cultivar: dose	6	0,2564	0,04274	0,6129	0,7184
Residual	36	2,511	0,06974		

Fonte: Do autor (2020).
CV = 13.38 %

Tabela 16 - Teor médio de potássio nas folhas das plantas das cultivares Catuaí IAC-144, MGS Ametista e MGS Paraíso 2.

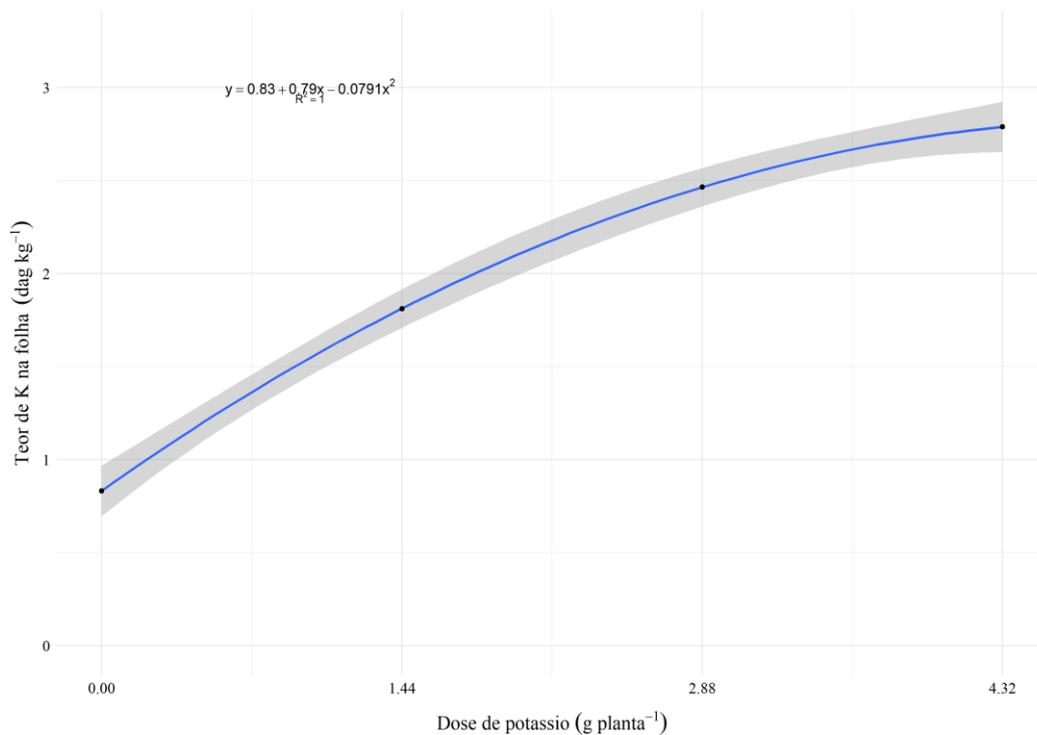
Cultivar	Teor de Nitrogênio (dag.kg ⁻¹)
MGS Ametista	2,078 A
MGS Paraíso 2	2,066 A
Catuaí IAC-144	1,776 B

Fonte: Do autor (2020).

Médias seguidas pela mesma letra na coluna pertencem ao mesmo grupo, de acordo com o critério de agrupamento de Scott-Knott (1974), a 5% de probabilidade.

As cultivares MGS Ametista e MGS Paraíso 2, não apresentaram diferenças entre si, porém foram superiores a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, mostrando um maior teor foliar de potássio, quando submetidas às doses testadas de K₂O (TABELA 16).

Figura 10 - Teor de potássio nas folhas das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K₂O (0, 1.44, 2.88 e 4.32 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, pela Figura 10, que o teor de potássio nas folhas (independente das cultivares avaliadas) apresentou um efeito quadrático crescente, com 0,83 dag.kg⁻¹ na dose 0g de K₂O e chegando ao valor de 2,77 dag.kg⁻¹ na dose máxima testada (4,32g de K₂O planta⁻¹).

4.4 A modelagem do crescimento de plantas

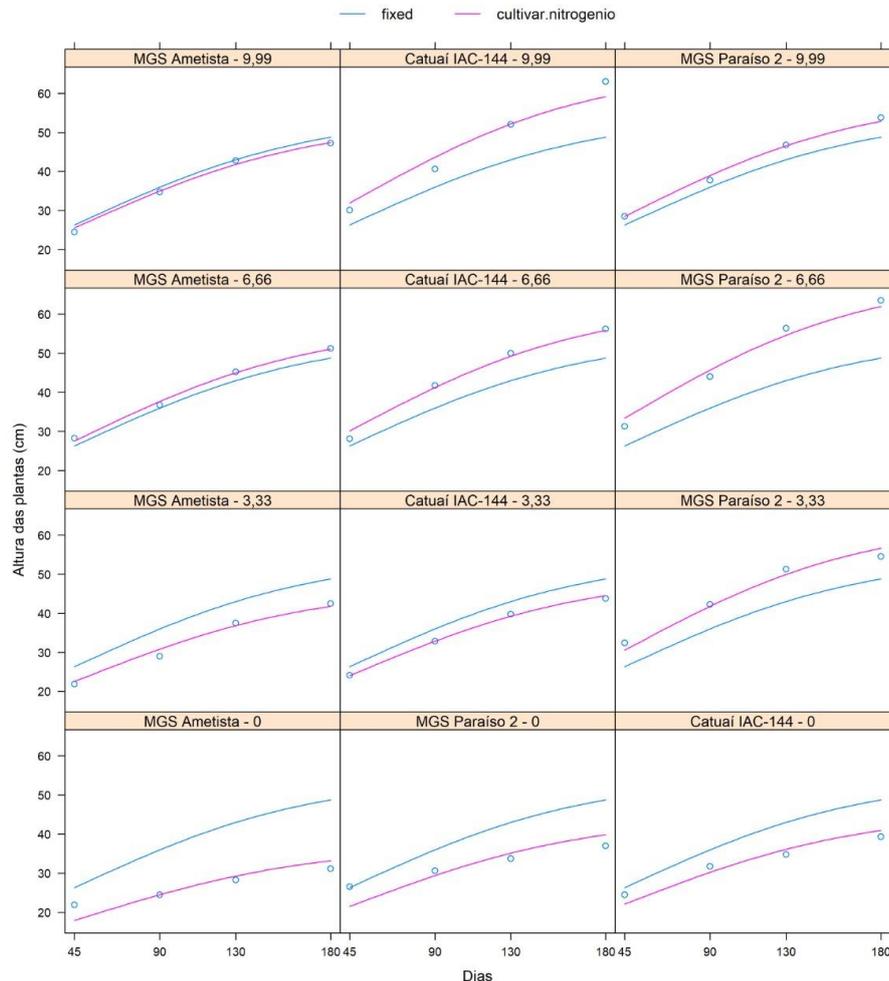
O estudo do crescimento de plantas e animais é amplamente utilizado nas ciências biológicas e outras áreas como forma de explicar como os indivíduos, geralmente, se desenvolvem. Nestes estudos, são utilizados os modelos de regressão, os quais podem ser vistos com maiores detalhes em Draper e Smith (1998), Graybill e Iyer (2004) e Rencher e Schaalje (2008) entre outros.

Uma alternativa ao uso dos modelos lineares tem sido os modelos não lineares, conforme descrição da evolução do crescimento do cafeeiro irrigado e não irrigado por Carvalho *et al.* (2006) e Pereira *et al.* (2014), que utilizaram os modelos logístico e o de Gompertz.

Na literatura especializada, é encontrada uma série de trabalhos sobre a modelagem do crescimento vegetativo do cafeeiro, usando modelos não lineares, entretanto, em nenhum deles são utilizados modelos de efeitos mistos. Peek *et al.* (2002) combinaram a análise de modelos mistos com curvas não lineares, obtendo coeficientes, biologicamente, interpretáveis e reduzindo o viés do erro padrão estimado usado nas comparações entre tratamentos.

4.5 Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de N

Figura 11 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de N (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹).



Nota-se, pela Figura 11, a curva de crescimento em relação à altura das plantas das cultivares estudadas submetidas a diferentes doses de N (0, 3.33, 6.66 e 9.99g planta⁻¹), observa-se que as 3 cultivares avaliadas (Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista) na dose 0g, ficaram abaixo da média, em relação a característica avaliada.

Quando a dose aplicada foi de 3.33 g de N por vaso, a cultivar MGS Paraíso 2 foi mais eficiente em relação às demais cultivares estudadas, ficando com um ganho em altura superior à média das cultivares.

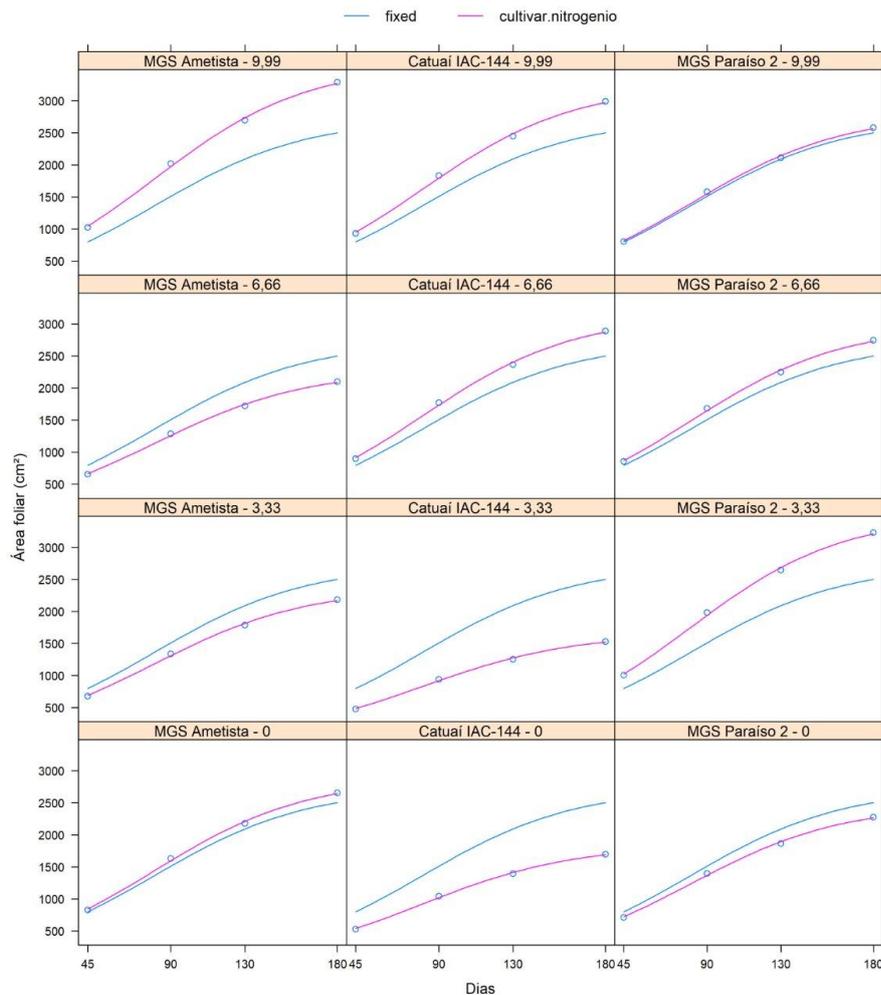
Já, na dose de 6.66g de N, por vaso, todas as cultivares ficaram acima da média, sendo que a MGS Ametista apresentou ganho menor, em relação às demais cultivares quanto à altura.

A Catuaí Vermelho IAC 144 com um ganho intermediário em relação às demais e a MGS Paraíso 2, novamente se destacou para essa característica nessa dose avaliada em relação às demais cultivares.

Na dose de 9.99g de N, por vaso, o comportamento da cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 apresentou maior ganho em altura em relação às demais, a cultivar MGS Paraíso 2 ficou acima da média, porém a cultivar MGS Ametista ficou novamente abaixo da média com menor ganho em altura de plantas.

4.6 Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de N

Figura 12 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de N (0, 3.33, 6.66 e 9.99 g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

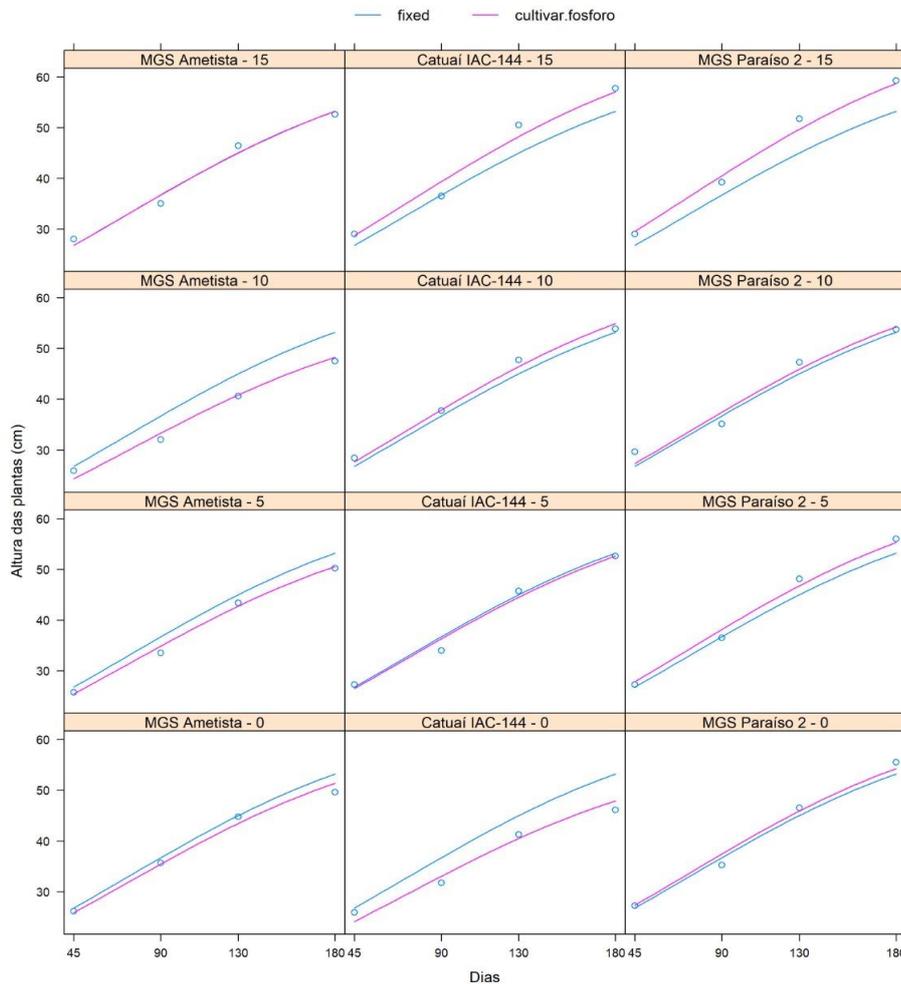
Na dose zero, a cultivar MGS Ametista apresentou maior área foliar em relação às demais, ficando acima da média das cultivares em relação a essa característica. Quando a dose aplicada foi de 3.33g de N por vaso, a cultivar MGS Paraíso 2 foi superior em relação às demais cultivares estudadas, com um ganho em área foliar acima da média das cultivares. As cultivares MGS Ametista e Catuaí Vermelho IAC 144, nessa dose, ficaram abaixo da média.

As cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e MGS Paraíso 2, na dose de 6.66 g de N, por vaso, ficaram acima da média, e a Ametista abaixo da média em relação à área foliar.

Já, na dose de 9.99g de N, por vaso, as 3 cultivares ficaram acima da média, sendo a MGS Paraíso 2 com um ganho menor que a Catuaí Vermelho IAC 144, ficando bem próximo da média, e a cultivar MGS Ametista com um ganho superior em área foliar em relação às demais cultivares.

4.7 Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de P_2O_5

Figura 13 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P_2O_5 (0, 5, 10 e 15g planta⁻¹).



Fonte: Do autor (2020).

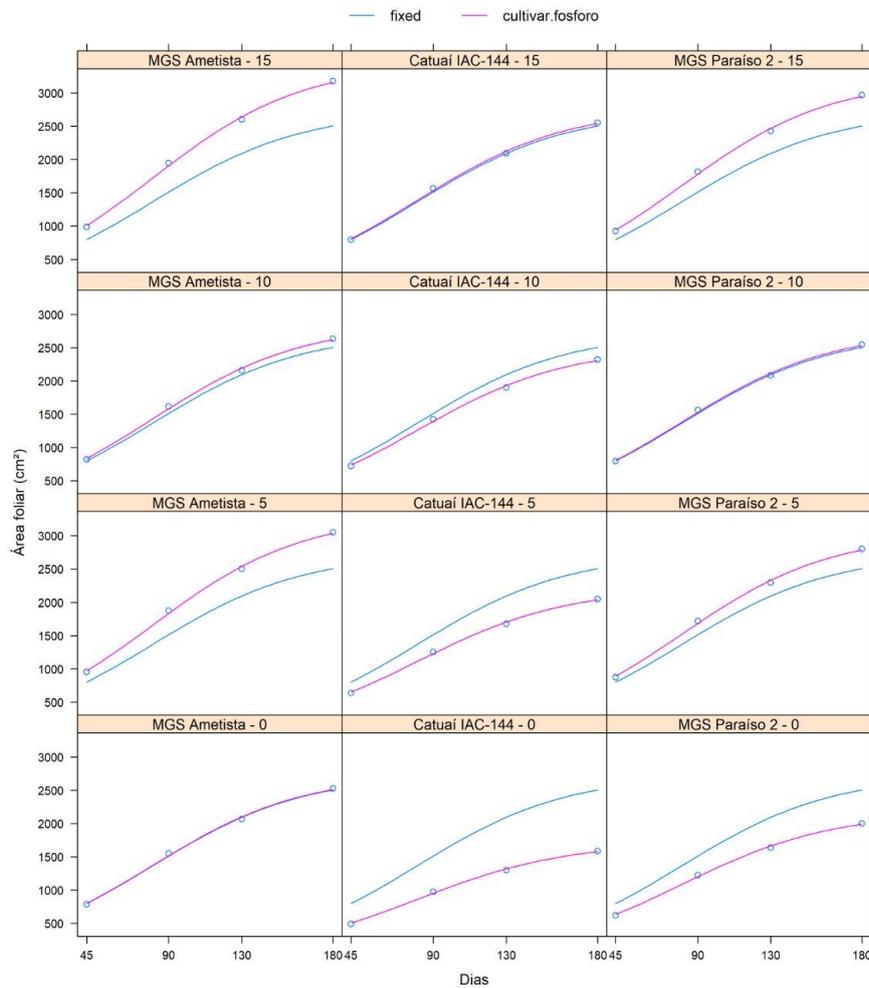
Nota-se, pela Figura 13, que a curva de crescimento em relação à altura das cultivares submetidas a diferentes doses de P_2O_5 (0, 5, 10 e 15g planta⁻¹), a cultivar MGS Ametista nas doses 0, 5 e 10g planta⁻¹, ficou abaixo da média das cultivares na característica de altura, e na maior dose (15g planta⁻¹) se igualou a média das cultivares.

A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 na dose 0g, ficou abaixo da média das cultivares, na dose 5g planta⁻¹ chegou bem perto da média, mas somente na dose 10 e 15g apresentou resultados superiores à média das cultivares, destacando-se na dose de 15g planta⁻¹, mostrando ser responsiva para crescimento em altura ao aumento das doses de P_2O_5 . A cultivar Paraíso 2 mostrou-se superior à média das cultivares em todas as doses testadas, apresentando um ganho

maior em altura na dose de 15g, permitindo inferir que seja uma cultivar mais responsiva que as demais quanto às adubações de P_2O_5 .

4.8 Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de P_2O_5

Figura 14 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de P_2O_5 (0, 5, 10 e 15g planta⁻¹).



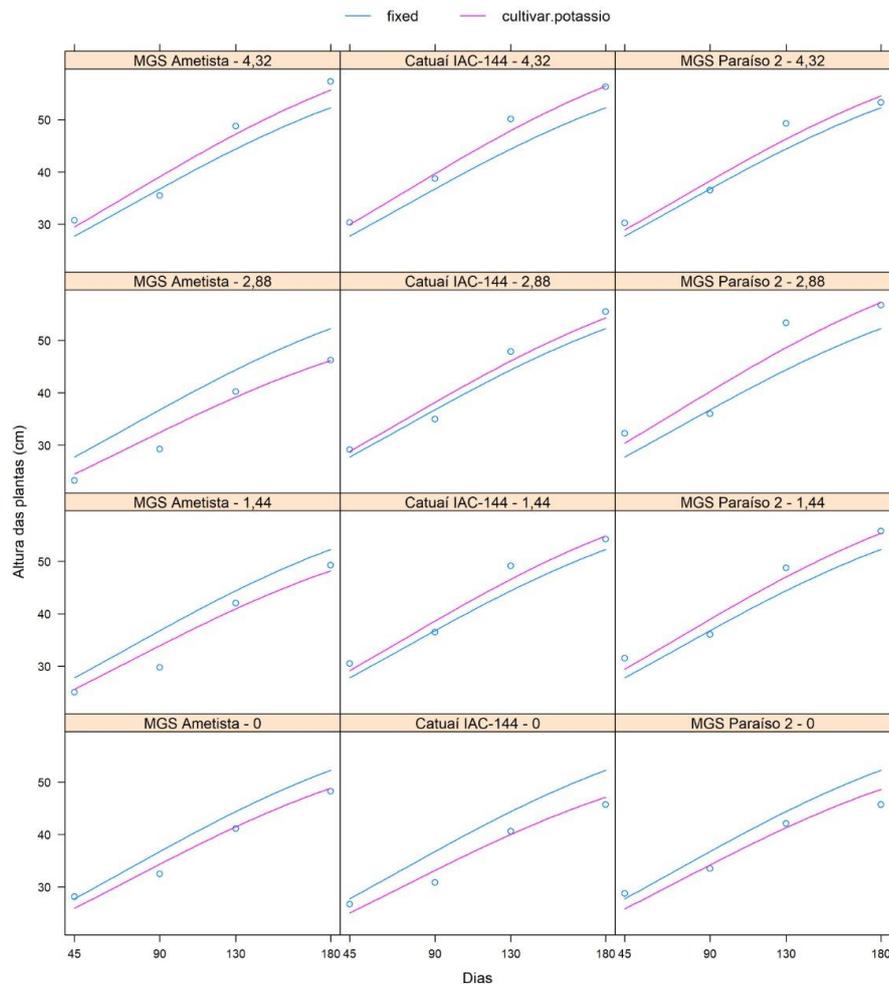
Nota-se, pela Figura 14, que nas curvas de crescimento em relação à área foliar das cultivares submetidas a diferentes doses de P_2O_5 (0, 5, 10 e 15g planta⁻¹), a cultivar MGS Ametista, com dose 0g ficou na média das cultivares e acima da média nas doses 5, 10 e 15g planta⁻¹, com os maiores ganhos em área foliar nas doses de 5 e 15g planta⁻¹ de P_2O_5 .

A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 nas doses 0, 5 e 10g planta⁻¹ ficou abaixo da média das cultivares. Na dose de 15g planta⁻¹ que ela se igualou à média das cultivares.

A cultivar Paraíso ficou abaixo da média das cultivares somente na dose 0g planta⁻¹ de P₂O₅, na dose de 10g a cultivar ficou na média das cultivares para o ganho em área foliar, e nas doses 5 e 15g planta⁻¹, foi superior à média, mostrando o mesmo comportamento da cultivar Ametista para essa característica avaliada.

4.9 Curva de Crescimento em altura para as cultivares submetidas a diferentes doses de K₂O

Figura 15 - Curva de Crescimento em altura das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K₂O (0, 1,44, 2,88 e 4,32g planta⁻¹).



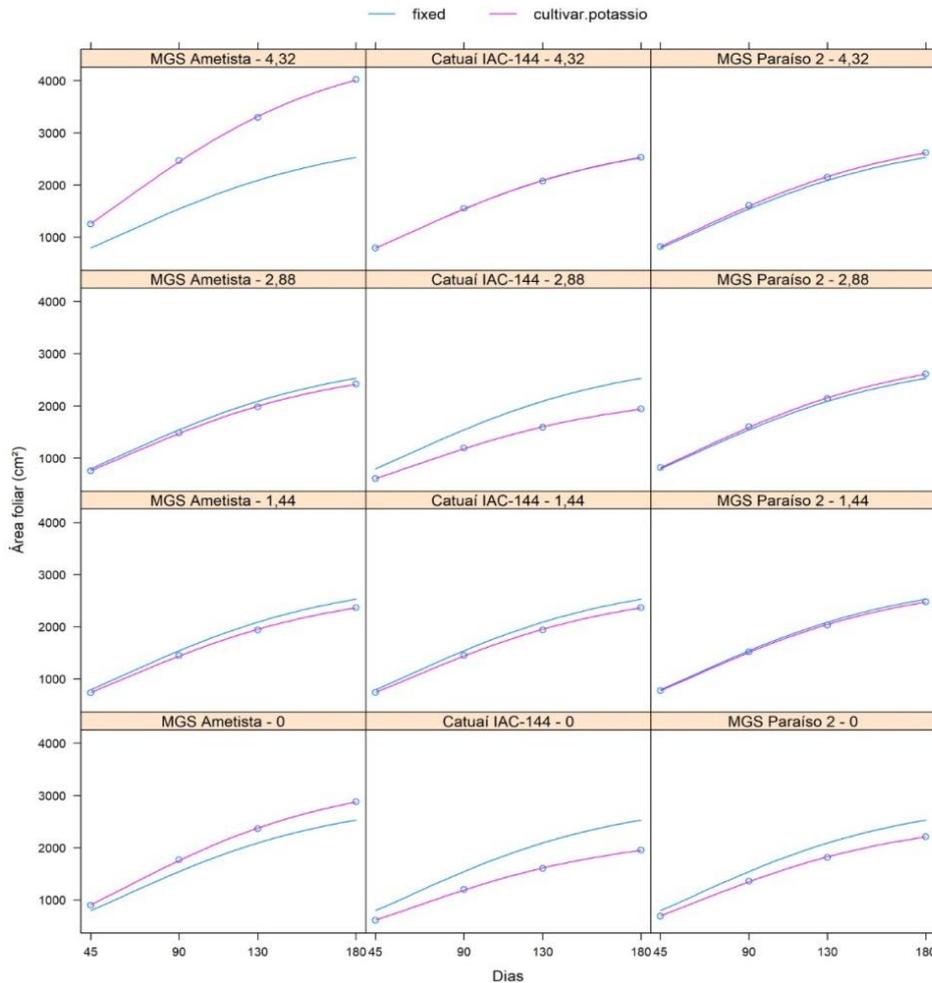
Fonte: Do autor (2020).

Nota-se, pela Figura 15, que, ao se observar a curva de crescimento em relação à altura das cultivares submetidas a diferentes doses de K_2O (0, 1.44, 2.88 e 4.32g planta⁻¹), que as plantas da cultivar MGS Ametista ficaram abaixo da média das cultivares nas doses 0, 1.44 e 2.88g planta⁻¹, para essa característica avaliada, respondendo a adubação de K_2O na dose 4.32g planta⁻¹, quando ficaram acima da média. Essa constatação permite a inferência de que essa cultivar é mais exigente em potássio no seu crescimento inicial, e responsiva ao aumento de dose do nutriente.

Já as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e MGS Paraíso 2 ficaram abaixo da média das cultivares somente na dose 0g planta⁻¹, nas demais doses 1.44, 2.88 e 4.32g planta⁻¹ de K_2O elas mostraram superiores à média das cultivares para a característica avaliada, mostrando um melhor aproveitamento do nutriente na fase inicial de desenvolvimento.

4.10 Curva de Crescimento em área foliar para as cultivares submetidas a diferentes doses de K_2O

Figura 16 - Curva de Crescimento em área foliar das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144, MGS Paraíso 2 e MGS Ametista, submetidas a 4 doses de K_2O (0, 1.44, 2.88 e $4.32g\ planta^{-1}$).



Observa-se, pela Figura 16, a curva de crescimento em relação à área foliar das cultivares submetidas a diferentes doses de K_2O (0, 1.44, 2.88 e $4.32g\ planta^{-1}$), em que as plantas da cultivar MGS Ametista ficaram com área foliar abaixo da média das cultivares nas doses 1.44 e $2.88g\ planta^{-1}$, porém, acima da média, nas doses 0 e $4g\ planta^{-1}$, com grande para esta última, mesmo resultado visto na avaliação de ganho em altura, mostrando ser mais exigente em potássio no seu desenvolvimento inicial e bastante responsiva ao aumento de dose do nutriente.

Já, a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 ficou abaixo da média das cultivares, nas doses 0, 1.44 e $2.88g\ planta^{-1}$, na característica de área foliar e chegando na média somente na dose

4,32g, mostrando também a grande necessidade do nutriente na fase inicial de crescimento, porém menos responsiva nas doses testadas.

A cultivar MGS Paraíso 2 ficou abaixo da média das cultivares na dose 0g planta⁻¹ de K₂O para ganho em área foliar, nas demais doses 1.44, 2.88 e 4.32g planta⁻¹ de K₂O a cultivar ficou muito próxima da média das cultivares para essa característica.

5 CONCLUSÕES

- a) Concluiu-se que a cultivar MGS Paraíso 2 foi mais eficiente no aproveitamento do N aplicado, com maior ganho em altura, entre as doses de 3 a 6g planta⁻¹ de N por vaso, e menos exigente em P, com maior ganho em altura na dose 0g planta⁻¹ de P₂O₅ em relação às demais cultivares avaliadas.
- b) A cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, mostrou ser mais exigente em N, com ganho em altura superior às demais, somente na maior dose testada de 9,99g planta⁻¹ de N, e mais exigente em P, com maior ganho em altura também na maior dose testada de 15g planta⁻¹ de P₂O₅.
- c) A cultivar MGS Ametista, teve menor ganho em altura que a cultivar Catuai vermelho IAC 144 na dose de 9,99g planta⁻¹ de N e não mostrou ganho em altura nas diferentes doses de P₂O₅ aplicadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. P. de; LOPES, M. A.; DEUS, V. P. de. Avaliação da fertilidade do solo e do estado nutricional do cafeeiro: *Coffea arabica* L. no oeste as Bahia. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL*, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais** [...]. Brasília, DF: Ed. Embrapa Café, 2003. p. 395-396.
- ALMEIDA FHER, L. C. F. *et al.* Análise das variáveis de custos do café arábica nas principais regiões produtoras do Brasil. **REUNA**, Belo Horizonte, v. 17, n. 2, p. 97-115, 2012.
- ALVES, J. D.; LIVRAMENTO, D. E. **Morfologia e fisiologia do cafeeiro**. Lavras: Ed. UFLA/FAEPE, 2009. 46 p. (Textos Acadêmicos).
- ANDRADE, L. R. M. Corretivos e fertilizantes para culturas perenes e semiperenes. *In: SOUSA, D. M. de; LOBATO, E. (ed.). Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2004. p. 317-366.
- ANDRADE, W. E. de B. *et al.* **Diagnose nutricional de cafeeiros da região Norte Fluminense: safras 1998/1999 e 1999/2000**. Niterói: Ed. PESAGRO-RIO, 2001. 5 p. (Comunicado técnico, 267).
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. *In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. (ed.). Nutrição mineral de plantas*. Viçosa, MG: SBCS, 2006. p. 253-280.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 14, p. 371-375, 1939.
- ASSAD, E. D. *et al.* Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 1057-1064, 2004.
- BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 3, p. 448-456, May/June 1996.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. *In: SIQUEIRA, J. O. et al. (ed.). Inter-relação fertilidade, 57 biologia do solo e nutrição de plantas*. Lavras: Ed. SBCS, 1998. p. 183-204.
- BARROS, R. S. *et al.* Determinação da área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. Bourbon Amarelo). **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 20, n. 107, p. 44-52, jan./mar. 1973.
- BATAGLIA, O. C.; DENCHEN, A. R.; SANTOS, W. R. Diagnose e análise de plantas. *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 20., 1992, Piracicaba. **Anais** [...]. Piracicaba: Ed. SBCS, 1992. p. 369-404.
- BATES, D. *et al.* **R Core Team 2020: nlme: linear and nonlinear mixed effects models**. R Package Version 3.1-149. 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>. Acesso em: 19 fev. 2021.

BOTELHO, C. E. *et al.* **Clima e solo para o cultivo do cafeeiro**. Belo Horizonte: Ed. Epamig, 2010. 4 p. (Circular técnica, 87).

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Ed. SBCS, 2007. p. 375-470.

CARVALHO, A. M. de *et al.* Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 3, p. 269-275, mar. 2010.

CARVALHO, C. H. M. *et al.* Evolução do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) irrigado e não irrigado em duas densidades de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 243-250, mar./abr. 2006.

CARVALHO, J. G. de *et al.* **Diagnose da fertilidade do solo e do estado nutricional de plantas**. Lavras: Ed. UFLA/FAEPE, 2001. 95 p.

CHAVES, J. C. D.; ANDROCIO FILHO, A. Estado nutricional de cultivares de cafeeiros sob densidades diferentes de plantio em quatro níveis de fertilização. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais [...]**. Brasília, DF: Ed. Embrapa Café, 2003. p. 415-416.

CLARK, R.; DUNCAN, R. R. Improvement of plant mineral nutrition through breeding. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 27, p. 219-240, 1991.

CLEMENTE, F. M. V. T. *et al.* Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes no cafeeiro em pós-plantio: primeiro ano. **Coffee Science**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 47-57, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira - café - safra 2020 - 1º levantamento**. Disponível em: file:///C:/Users/zilda/Downloads/E-book_BoletimZdeZSafrasZcafe.pdf. Acesso em: 22 jan. 2020.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. **Novas cultivares**. Disponível em: <http://www.consorcioquesquisacafe.com.br>. Acesso em: 15 nov. 2020.

COSTA, A. R. *et al.* Número de ramos plagiotrópicos e produtividade de duas cultivares de cafeeiro utilizando irrigação por gotejamento. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 571-581, 2001.

DARA, S. T.; FIXEN, P. E.; GELDERMAN, R. H. Sufficiency level and diagnosis an thew corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 6, p. 1006-1010, Nov./Dec. 1992.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3rd ed. New York: J. Wiley, 1998. 706 p.

- DOMINGHETTI, A. W. *et al.* Doses de fósforo e irrigação na nutrição foliar do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 18, p. 1235-1240, 2014.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Evolução da cafeicultura brasileira nas últimas duas décadas**. Brasília, DF: Ed. Embrapa Café, 2020. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Consortio-Embrapa-Cafe-Evolucao-24-1-2017.pdf. Acesso em: 23 ago. 2020.
- ERNANI, P. R. *et al.* Potássio. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Ed. SBCS, 2007. p. 551-594.
- EVENHUIS, B.; WAAR, P. W. Principles and practices in plant analysis. *In*: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Soils**. Rome: FAO press, 1980. p. 152-163. (FAO. Bulletin, 38/1).
- FLÜGGE, U. I. *et al.* Functional genomics of phosphate antiport systems of plastids. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 118, p. 475-482, 2003.
- FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2001. 122 p.
- FURTINI NETO, A. E. **Eficiência nutricional, cinética de absorção e frações fosfatadas em *Eucalyptus spp.*** 1994. 99 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.
- GODDARD, R. E.; HOLLIS, C. A. The genetic basics of forest tree nutrition. *In*: BOWEN, G. D.; NAMBIER, E. K. S. (ed.). **Nutrition of plantation forest**. London: Academic, 1984. p. 237-258.
- GONTIJO, R. A. N.; GUIMARÃES, R. J. Crescimento e teor foliar de nutrientes em cafeeiro decorrente da omissão isolada e simultânea de Ca, B, Cu e Zn. **Coffee Science**, Lavras, v. 3, n. 2, p. 124-132, jul./dez. 2008.
- GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. *In*: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p. 57-102.
- GRAYBILL, F. A.; IYER, H. K. **Regression analysis: concepts and applications**. Belmont: Duxbury, 2004. 699 p.
- GUERRA, A. F. *et al.* Aprimoramento do sistema de produção de café (*Coffea arabica*, L.) irrigado no cerrado. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5., 2007, Águas de Lindóia. **Resumos expandidos [...]**. Brasília, DF: Ed. Embrapa; CBP&D Café, 2007. 1 CD-ROM.
- GUERRA, A. F. *et al.* Manejo da irrigação do cafeeiro, com estresse hídrico controlado, para uniformização de florada. *In*: ZAMBOLIM, L. (ed.). **Boas práticas agrícolas na produção de café**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2006. p. 83-115.

GUERRA, A. F. *et al.* Resposta do cafeeiro arábica a aplicação de fósforo. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA*, 10., 2008, Araguari. **Resumos expandidos** [...]. Araguari: Ed. Embrapa Café, 2008. p. 62-66.

GUIMARÃES, P. T. G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. *In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA*, 2., 1992, Uberaba. **Anais** [...]. Uberaba: Ed. IBRAFOS, 1992. p. 175-190.

GUIMARÃES, P. T. G. *et al.* Cafeeiro. *In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-VENEGAS, V. H. (ed.). Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. aproximação.* Viçosa, MG: Ed. CFSEMG, 1999. p. 289-302.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G. **Nutrição mineral do cafeeiro.** Lavras: Ed. UFLA/FAEPE, 1997. 70 p.

HENDRICKSON, L.; CHOW, W. S.; FURBANK, R. T. Low temperature effects on grapevine photosynthesis: the role of inorganic phosphate. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 31, p. 789-801, 2004.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Total production by all exporting countries.** Disponível em: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2020.

LANA, R. M. Q. *et al.* *Coffea arabica* L. nutritional status survey based on dris, in the upper Paranaíba region, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 1147-1156, 2010.

LAVIOLA, B. G. *et al.* Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: cálcio, magnésio e enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1451-1462, 2007.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 319-329, mar./abr. 2007.

LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 25, p. 275-294, 2002.

LÓPEZ-BUCIO, J. *et al.* Phosphate availability alters architecture and causes changes in hormone sensitivity in the Arabidopsis root system. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 129, p. 244-256, 2002.

MAGALHÃES, J. C. A. J.; SAMPAIO, J. B. R.; SILVA, J. E. da. Adubação de manutenção de cafezais em solos de cerrado. *In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982-1985.* Planaltina: Ed. Embrapa, 1987. p. 346-349.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 683 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. *In*: RENA, A. B. *et al.* (ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p. 165-274.

MALAVOLTA, E. *et al.* **Seja o doutor do seu cafezal**. Piracicaba: Informações Agronômicas, 1993. Encarte.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: Ed. Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic, 1997. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P. *et al.* Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 61, p. 838-848, nov./dez. 2014. Suplemento.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G. de; SOUZA, R. B. de. Diagnose foliar. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-VENEGAS, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5^a aproximação. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 143-168.

MATIELLO, J. B. Redução do potássio na adubação de cafeeiros em solos desequilibrados, na Zona da Mata de Minas. **Revista Brasileira de Tecnologia Cafeeira**: pesquisas, recomendações e análises, Varginha, n. 13, p. 14-15, 2008.

MATIELLO, J. B. *et al.* Podas. *In*: MATIELLO, J. B. *et al.* **Cultura de café no Brasil**: novo manual de recomendações. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. p. 256-274.

MATIELLO, J. B.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R. **Adubos, corretivos e defensivos para a lavoura cafeeira**: indicações de uso. Varginha: Fundação Procafé, 2006. 112 p.

MELDAL-JOHNSEN, A.; SUMNER, M. E. Foliar diagnosis norms for potatoes. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 2, n. 5, p. 569-576, 1980.

MELO, B. *et al.* Substratos, fontes e doses de P₂O₅ na produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em tubetes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 19, n. 2, p. 35-44, maio/ago. 2006.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principales of plant nutrition**. 4th ed. Berna: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MILLS, H. A.; JONES JUNIOR, J. B. **Plant analysis handbook II**. 2nd ed. Athens: Micro-Macro, 1996. 422 p.

PEEK, M. S. *et al.* Physiological response curve analysis using nonlinear mixed models. **Oecologia**, Berlin, v. 132, n. 2, p. 175-180, July 2002.

PEREIRA, A. A. *et al.* Descrição do crescimento vegetativo do cafeeiro cultivar Rubi MG 1192, utilizando modelos de regressão. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 266-274, maio 2014.

PEREIRA, J. B. D. **Eficiência nutricional de nitrogênio e de potássio em plantas de café (*Coffea arabica* L.)**. 1999. 99 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. New York: Springer, 2009. 548 p.

PINTO, C. G. *et al.* Faixas críticas de teores foliares de nitrogênio, fósforo e potássio para o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) fertirrigado para o primeiro ano pós-plantio. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, p. 530-538, 2013.

PREZOTTI, L. C. Fertilização do cafeeiro. *In*: ZAMBOLIM, L. (ed.). **Tecnologias de produção de café com qualidade**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2001. p. 607-615.

PREZOTTI, L. C.; ROCHA, A. C. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 239-251, maio/ago. 2004.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto de Potassa & Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.

RAIJ, B. van. *et al.* (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Ed. IAC, 1997. 285 f. (IAC. Boletim técnico, 100).

REIS, T. H. P. *et al.* Estado nutricional e frações foliares de P no cafeeiro em função da adubação fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 7, p. 757-764, 2013.

REIS JUNIOR, R. dos A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 537-542, 2002.

RENCHER, A. C.; SCHAALJE, G. B. **Linear models in statistics**. 2nd ed. New Jersey: J. Wiley, 2008. 672 p.

RESENDE, T. B. **Crescimento e produtividade de cafeeiros fertirrigados com diferentes níveis de N, P e K**. 2019. 82 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. **Plant analysis: an interpretation manual**. 2nd ed. Melbourne: Inkata, 1988. 218 p.

SANTOS, M. G. dos *et al.* The role of inorganic phosphate on photosynthesis recovery of common bean after a mild water deficit. **Plant Science**, Shannon, v. 170, p. 659-664, 2006.

SAUERBECK, D. R.; HELAL, H. M. Factors affecting the nutrient efficiency of plants. *In*: EL BASSAN, N. *et al.* (ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Berlin: Kluwer Academic, 1990. p. 11-17.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington DC, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SHUBHRA, Q. T. H. *et al.* Influence of phosphorus application on water relations, biochemical parameters and gum content in cluster bean under water deficit. **Biologia Plantarum**, Copenhagen, v. 48, p. 445-448, 2004.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SILVA, E. B. *et al.* Fontes e doses de potássio na produção e qualidade do grão de café beneficiado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 3, p. 335-345, 1999.

SILVA, L. *et al.* Fotossíntese, relações hídricas e crescimento de cafeeiros jovens em relação à disponibilidade de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 9, p. 965-972, 2010.

SILVA, M. G. da *et al.* Spatio-temporal aspects of brown eye spot and nutrients in irrigated coffee. **European Journal of Plant Pathology**, Dordrecht, v. 153, n. 3, p. 931-946, 2019.

SILVA, R. A. *et al.* Avaliação do estado nutricional do coqueiro anão verde fertirrigado com nitrogênio e potássio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 4, p. 17-28, out./dez. 2008.

SOBREIRA, F. M. **Adubação do cafeeiro fertirrigado em fase de formação no Sul de Minas Gerais**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SOBREIRA, F. M. *et al.* Adubação nitrogenada e potássica de cafeeiro fertirrigado na fase de formação em plantio adensado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 1, p. 9-16, jan. 2011.

SOUZA, A. J. J. *et al.* Doses de fósforo no crescimento inicial de cafeeiros em solos com diferentes texturas. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, p. 284-288, 2014.

SOUZA, R. B. **Níveis críticos de enxofre em solos e folhas de cultivares de café**. 1999. 88 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

TAIZ, L. *et al.* **Physiology and plant development**. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TOMAZ, M. A.; AMARAL, J. F. T. **Eficiência nutricional em plantas: estudos avançados em produção vegetal**. Alegre: Ed. Centro de Ciências Agrárias, UFES, 2008. v. 1.

VILELA, D. J. M. **Crescimento inicial de cultivares de cafeeiro com diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio**. 2014. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

VILELA, M. S. **Nitrogen, phosphorus and potassium in coffee crop in vegetative stage and on brown eye spot management**. 2020. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

VILLELA, G. M. *et al.* Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes primários para cafeeiros fertirrigados em formação. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, p. 271-279, 2015.

VOSE, P. B. Genetical aspects of mineral nutrition: progress to date. *In*: GABELMAN, H. W.; LOUHMANN, A. (ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Boston: Lancaster, 1987. p. 3-13.

ZHANG, Y. *et al.* Effects of partial replacement of potassium by sodium on cotton seedling development and yield. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 29, n. 10, p. 1845-1854, 2006.