



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

**FOTOSSÍNTESE, CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO
FEIJOEIRO SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE SUBDOSES DE GLYPHOSATE**

Botucatu

2019

FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

**FOTOSSÍNTESE, CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO
FEIJOEIRO SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE SUBDOSES DE GLYPHOSATE**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Professor Doutor Marcelo de
Almeida Silva

Botucatu

2019

B739f

Bortolheiro, Fernanda Pacheco de Almeida Prado
Fotossíntese, concentração de nutrientes e
produtividade do feijoeiro submetido à aplicação de
subdoses de glyphosate / Fernanda Pacheco de Almeida
Prado Bortolheiro. -- Botucatu, 2019
132 p. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Marcelo de Almeida Silva

1. Ecofisiologia vegetal. 2. Leguminosa. 3. Hormese. 4.
Plantas Efeito de glifosato. 5. Glyphosate. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca
da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“FOTOSSÍNTESE, CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE SUBDOSES DE GLYPHOSATE”**

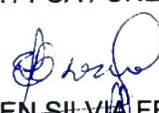
AUTORA: FERNANDA PACHECO DE ALMEIDA PRADO BORTOLHEIRO

ORIENTADOR: MARCELO DE ALMEIDA SILVA

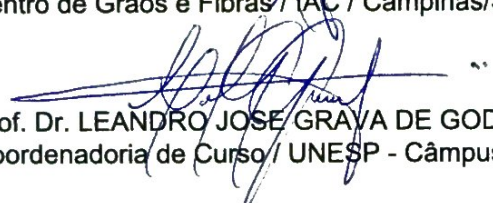
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI
Produção Vegetal / FCA / UNESP - Botucatu


Prof.ª Dr.ª CARMEN SILVA FERNANDES BOARO
Botânica / Instituto de Biodiências de Botucatu - UNESP


Pesquisador Dr. ALISSON FERNANDO CHIORATO
Centro de Grãos e Fibras / IAC / Campinas/SP


Prof. Dr. LEANDRO JOSE GRAVA DE GODOY
Coordenadoria de Curso / UNESP - Câmpus de Registro

Botucatu, 29 de março de 2019.

Aos meus queridos pais, Maria Cecília e Aguinaldo, e avó Maria Cecília que sempre me incentivaram e que são verdadeiros exemplos de garra, honestidade, respeito e paciência para com os desafios da vida.

A minha irmã Carolina.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por estar presente em minha vida em todos os momentos me dando força para seguir em frente.

À minha família, que sempre estiveram do meu lado me apoiando e dando suporte para as minhas realizações. Obrigada pelo amor e carinho.

Ao meu noivo Murilo por todo apoio, amor, carinho, paciência, amizade e ajuda, tornando a caminhada mais suave e agradável.

À Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, pela oportunidade de realização do Curso de Doutorado e pela infraestrutura disponibilizada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela orientação, ensinamentos, amizade, paciência, confiança depositada em mim e ajuda na realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a execução deste trabalho de pesquisa.

Ao Instituto Agronômico de Campinas (IAC) pela doação das sementes, que tornou possível a realização deste trabalho.

À Marcela, pelo convite para realização deste trabalho, por todo companheirismo, ajuda, ideias, amizade, cumplicidade, paciência, risadas, momentos de descontração e por tudo o que fez por mim nos momentos mais difíceis. Com certeza será uma amizade para a vida toda.

À banca examinadora pela disponibilidade de participação e pelas sugestões.

Aos amigos e companheiros de trabalho do Laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura (LECA): Marcela, Samara, Breno, Vinícius, Mariana, Ana, Vanessa, Jania, Dayane, Gabriel, Vicente e aos estagiários, pela ajuda na condução do experimento, companheirismo e momentos de descontração.

Aos amigos da pós-graduação Michely, Marcela, Laís, Samara, Breno, Vinícius, Mariana, Ana, Vanessa, Jania, Dayane, pelas conversas, ajudas, e também pelos momentos de descontração e risadas.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho.

A todos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Glyphosate em subdoses pode estimular o crescimento das plantas. O efeito estimulatório de baixas doses de um composto tóxico é conhecido como hormese. Estudos como este são de fundamental importância para a adoção do manejo desta tecnologia. A hipótese desta pesquisa foi que subdoses de glyphosate promovem alterações a nível morfológico, fisiológico, nutricional e de produção em plantas de feijoeiro comum. Deste modo, o objetivo foi avaliar as alterações morfológicas, nutricionais, fisiológicas e na produtividade de grãos do feijoeiro comum de ciclo precoce submetido à aplicação de subdoses de glyphosate e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura. Os experimentos foram conduzidos em campo e a cultivar utilizada foi a IAC Imperador, feijoeiro comum de ciclo precoce. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, constituído de doses de glyphosate aplicadas no estágio fenológico V₄, com quatro repetições. Foram realizados dois experimentos, o primeiro na safra de inverno e o segundo na safra das águas, no ano de 2016. Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹), na safra das águas, os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹). Foram avaliados: altura de plantas, área foliar, massa de matéria seca de folhas, caule e parte aérea, taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e peso específico de folha (PE), teores de macro e micronutrientes nas folhas e grãos, conteúdo de clorofila *a*, *b*, *total* e carotenoides, taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática, taxa de transpiração, concentração interna de CO₂, eficiência instantânea de carboxilação da rubisco, número de vagens por plantas, número de grãos por planta, número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos. A aplicação de subdoses de glyphosate proporcionou alterações, com influência da época de cultivo, nas variáveis avaliadas para o feijoeiro comum. Não foi observada uma dose única que beneficiasse todas as variáveis avaliadas em folhas e grãos do feijoeiro, no entanto, na safra de inverno podem ser destacadas as doses, 36 g e.a. ha⁻¹ por promover o crescimento das plantas; as doses 1,8; 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ por aumentar o teor de nutrientes e a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ por incrementar a produtividade de grãos. Na safra das águas, a dose

36 g e.a. ha⁻¹ promoveu o crescimento das plantas, a dose 12 g e.a. ha⁻¹ incrementou o teor de nutrientes e a dose 36 g e.a. ha⁻¹ aumentou a produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., hormese, análise quantitativa de crescimento, nutrição mineral, trocas gasosas, produtividade de grãos.

ABSTRACT

Glyphosate low doses can stimulate plant growth. The stimulatory effect of low dose use of a toxic compound is known as hormesis. Studies like this are of fundamental importance for the adoption of this technology. The hypothesis of this research is that glyphosate subdoses promote changes at the morphological, physiological, nutritional and production levels in common bean plants. Thus, the objective of this work was to evaluate if the application of glyphosate low doses promotes changes in common bean growth, physiology, nutritional and productivity and whether these effects are influenced by the planting seasons. Two experiments were conducted in the field and the cultivar used was the IAC Imperador, common bean of early cycle. The experimental design was a randomized block design, consisting of doses of glyphosate and one season of application (phenological stage V₄), with four replications. Two experiments were carried out in 2016, the first in the winter season and the second in the water season. In the winter season, treatments consisted of five glyphosate sub-doses (0, 1.8, 7.2, 12 and 36 g of acid equivalent (a.e.) ha⁻¹), in the water season, treatments consisted of seven subdoses of glyphosate (0.8, 7.2, 12, 36, 54 and 108 g of a.e. ha⁻¹). Plant height, leaf area, leaf dry mass, stem dry mass, shoots dry mass, growth rate (GR), relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR), leaf area ratio (LAR), specific leaf area (SLA), specific leaf weight (SLW), nutrient content on leaves and grains, chlorophyll *a*, *b*, *total* and carotenoids content, CO₂ assimilation rate, stomatal conductance, transpiration rate, CO₂ internal concentration, instantaneous carboxylation efficiency of rubisco, number of pods per plant, number of grains per plant, number of grain per pod, mass of 1000 grains and grain yield were evaluated. The application of glyphosate low doses, influenced by the growing season, resulted in changes in the evaluated parameters in common bean. There was no single dose that benefited all the variables evaluated in leaves and grains of common beans, however, in the winter season, the dose 36 g a.e. ha⁻¹ promoted plant growth, the doses 1.8; 7.2 and 36 g a.e. ha⁻¹ increased nutrient content and the dose 7.2 g a.e. ha⁻¹ increased grain yield. In the water season, the dose 36 g a.e. ha⁻¹ promoted plant growth, the dose 12 g a.e. ha⁻¹ increased nutrient content and the dose 36 g a.e. ha⁻¹ increased grain yield.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., hormesis, quantitative growth analysis, mineral nutrition, gas exchange, grain yield.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
CAPÍTULO 1 - SUBDOSES DE GLYPHOSATE ALTERAM O CRESCIMENTO DO FEIJOEIRO	22
1.1 Introdução.....	23
1.2 Material e métodos	26
1.2.1 Descrição da área experimental	26
1.2.2 Material vegetal	27
1.2.3 Delineamento experimental e tratamentos	27
1.2.4 Condução do experimento e aplicação dos tratamentos	28
1.2.5 Variáveis avaliadas.....	29
1.2.5.1 Altura de planta	29
1.2.5.2 Área foliar	29
1.2.5.3 Massa de matéria seca de folhas, caule e de parte aérea	29
1.2.5.4 Taxa de crescimento da cultura.....	30
1.2.5.5 Taxa de crescimento relativo	30
1.2.5.6 Taxa de assimilação líquida	30
1.2.5.7 Razão de área foliar	30
1.2.5.8 Área foliar específica	31
1.2.5.9 Peso específico da folha.....	31
1.2.6 Análise estatística.....	31
1.3 Resultados.....	31
1.3.1 Condições climáticas.....	31
1.3.2 Altura de plantas.....	32
1.3.3 Área foliar	34
1.3.4 Massa de matéria seca de folhas	36
1.3.5 Massa de matéria seca de caule	38
1.3.6 Massa de matéria seca de parte aérea	40
1.3.7 Taxa de crescimento da cultura.....	42
1.3.8 Taxa de crescimento relativo	43
1.3.9 Taxa de assimilação líquida	45
1.3.10 Razão de área foliar	47
1.3.11 Área foliar específica	49
1.3.12 Peso específico da folha.....	51

1.4	Discussão.....	53
1.5	Conclusão	60
REFERÊNCIAS		60
CAPÍTULO 2 - CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NAS FOLHAS E NOS GRÃOS DO FEIJOEIRO É AFETADA POR SUBDOSES DE GLYPHOSATE E ÉPOCAS DE CULTIVO.....		64
2.1	Introdução	65
2.2	Material e métodos.....	68
2.2.1	Descrição da área experimental.....	68
2.2.2	Material vegetal.....	68
2.2.3	Tratamento e delineamento experimental.....	69
2.2.4	Condução do experimento e aplicação dos tratamentos	69
2.2.5	Variáveis avaliadas	70
2.2.5.1	Teor de nutrientes nas plantas.....	70
2.2.5.2	Teor de nutrientes nos grãos	70
2.2.6	Análise estatística	70
2.3	Resultados	71
2.3.1	Condições climáticas durante o experimento.....	71
2.3.2	Teor de macronutrientes nas folhas.....	71
2.3.3	Teor de micronutrientes nas folhas.....	74
2.3.4	Teor de macronutrientes nos grãos	76
2.3.5	Teor de micronutrientes nos grãos.....	79
2.4	Discussão.....	81
2.5	Conclusão	90
REFERÊNCIAS		91
CAPÍTULO 3 - TROCAS GASOSAS E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE SUBDOSES DE GLYPHOSATE.....		95
3.1	Introdução	97
3.2	Material e métodos.....	99
3.2.1	Descrição da área experimental.....	99
3.2.2	Material vegetal.....	99
3.3.3	Tratamento e delineamento experimental.....	100
3.3.4	Condução do experimento e aplicação dos tratamentos	100
3.3.5	Variáveis fisiológicas.....	101
3.3.5.1	Conteúdo de clorofila e carotenoides.....	101

3.3.5.2 Taxa de assimilação de CO ₂ (<i>A</i>), condutância estomática (<i>g_s</i>), taxa de transpiração (<i>E</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>) e Eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>)	101
3.3.6 Componentes de produção	102
3.3.6.1 Número de vagem planta ⁻¹	102
3.3.6.2 Número de grãos planta ⁻¹	102
3.3.6.3 Número de grãos vagem ⁻¹	102
3.3.6.4 Massa de 1000 grãos	102
3.3.6.5 Produtividade de grãos	102
3.3.7 Análise estatística	103
3.4 Resultados	103
3.4.1 Condições climáticas durante o experimento	103
3.4.2 Conteúdo de clorofila	104
3.4.3 Taxa de assimilação de CO ₂ (<i>A</i>), condutância estomática (<i>g_s</i>), taxa de transpiração (<i>E</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>) e Eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>)	108
3.4.4 Componentes de produção	113
3.5 Discussão	116
3.6 Conclusão	123
REFERÊNCIAS	124
CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
REFERÊNCIAS	131

INTRODUÇÃO GERAL

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) pertence ao gênero *Phaseolus* e à família Fabaceae. Originário do continente americano contém aproximadamente 55 espécies, sendo as mais cultivadas: *P. vulgaris* L., *P. lunatus* L., *P. coccineus* L., *P. acutifolius* e *P. polyanthus* (SANTOS; GAVINALES, 2006). *Phaseolus vulgaris* L., popularmente conhecido como feijoeiro comum ou feijoeiro, é a espécie cultivada mais antiga em todos os continentes (SANTOS; GAVINALES, 2006).

As principais espécies cultivadas no Brasil são: *Phaseolus vulgaris* (feijão cores e preto), *Vigna unguiculata* (feijão-macassar, feijão-de-corda ou feijão-fradinho), *Phaseolus lunatus* (feijão-de-lima ou feijão fava) e *Cajanus cajan* (feijão-guandu) (CONAB, 2018). Dentre os diferentes tipos de feijões cultivados, o feijão comum representa 78% da produção do estado de São Paulo. O cultivo ocorre principalmente por pequenos produtores (74%), médios produtores (18%) e 8% por grandes produtores. No entanto, 76% da produção e 72% da área total do estado de São Paulo pertencem aos grandes produtores. A agricultura familiar representa cerca de 20% da produção total de feijão do estado (CONAB, 2018).

No Brasil, o cultivo do feijoeiro está difundido em praticamente todo o território nacional, e pode ser cultivado nos mais variados tipos de solo, clima e, principalmente, sistemas de produção, tais como cultivo solteiro, consorciado ou ainda intercalado com uma ou mais espécies (VIEIRA; BOREM; RAMALHO, 1999).

A semeadura do feijoeiro no Brasil pode ocorrer em três épocas. A primeira, conhecida como “safra das águas”, de agosto e setembro, concentra-se nas Regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Tocantins e Rondônia; a segunda safra, ou “safra da seca”, abrange todo o país e ocorre em janeiro e fevereiro; a terceira safra, ou “safra de inverno”, concentra-se mais no Centro-Sul do Brasil e acontece entre abril e junho (EMBRAPA, 2013).

A produção mundial de feijão, em 2017, foi igual a 31,4 milhões de toneladas, com produtividade média de 862 kg ha⁻¹ e área colhida de 36,4 milhões de hectares (FAO, 2017). A principal região produtora foi a Ásia (49,0%), seguida das Américas (25,2%), África (21,7%) e Europa (3,5%) (FAO, 2017).

No Brasil, a produção total de feijão na safra de 2017/18 foi de 3,1 milhões de toneladas, com área semeada de 3,2 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média total de 969 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Para a safra 2018/19, a

estimativa é de 3,1 milhões de hectares de área plantada, com 1.002 kg ha⁻¹ de produtividade e produção total de 3,1 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

As maiores regiões produtoras de feijão do Brasil são Sul e Centro–Oeste, cada uma responsável por 25% da produção total. Seguem-se as regiões Nordeste e Sudeste, contribuindo cada uma com 23%, e a região norte produz apenas 3% do total de feijão do país (CONAB, 2018).

O feijão destaca-se por possuir elevado teor de proteínas, entre 20 e 35%, dependendo da cultivar, e também possui elevado teor de lisina, fibras alimentares, carboidratos complexos, minerais, como cálcio, ferro e outros, além de vitaminas do complexo B, trazendo inúmeros benefícios a saúde (CONAB, 2018). É utilizado como principal fonte de proteína na alimentação de grande parte da população brasileira e nos países em desenvolvimento das regiões tropicais e sub-tropicais. No Brasil, o consumo do feijão é estimado em cerca de 14 kg hab⁻¹ ano⁻¹ (CONAB, 2018).

No Brasil a maior parte dos cultivares de feijoeiro utilizada pelos produtores apresentam ciclo normal, em torno de 85 a 90 dias, enquanto que, as cultivares de ciclo precoce apresentam ciclo de 75 dias ou menos (LEMOS et al., 2015). A característica de ciclo precoce é conhecida como a habilidade da cultura de completar o seu ciclo em período menor que aquele considerado médio ou normal (90 dias para o feijoeiro) (BURATTO et al., 2007). Segundo os autores, os programas de melhoramento têm buscado a produção de cultivares precoces.

Em condições ideais de temperatura e umidade e com bom índice de precipitação, os cultivares de feijoeiro precoce produzem menos que as de ciclo normal (VALE et al., 2015). Porém, seu uso apresenta vantagens, como, menor consumo de água, de tempo de uso do solo e insumos; possibilidade de rotação de culturas; redução nas perdas na colheita, evitando que esta coincida com o período chuvoso; maior renda ao agricultor, devido à colheita antecipada (BURATTO et al., 2007). Além disso, as cultivares precoces se adequam melhor ao cultivo no período de outono-inverno (VALE et al., 2015). Sendo assim, é de fundamental importância o uso de tecnologias que possam melhorar a produção do feijoeiro de ciclo precoce.

O termo Hormese, do grego “*hormaein*”, significa “excitar”. A definição de hormese é uma resposta bifásica, em que uma característica pode ser estimulada em doses baixas de um composto e inibida em doses elevadas do mesmo composto (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

Hugo Schutz foi o primeiro pesquisador a se deparar com o efeito bifásico de dose resposta no ano de 1880. Ele observou que elevadas doses de antissépticos inibiam o desenvolvimento de leveduras, porém baixas doses estimularam o desenvolvimento destas. Este conceito ficou conhecido como lei de Arndt-Sculz e, posteriormente, ganharia o nome de hormese (CALABRESE, 2015). Apesar de existir registros de que Paracelsus, no século 16, identificou que substâncias tóxicas poderiam ser benéficas em baixas doses (STEBBING, 1982; CALABRESE; BALDWIN, 1998).

Posteriormente, Southam e Ehrlich (1943) propuseram o termo hormese, descrevendo-a como o efeito estimulador de substâncias tóxicas em doses sub-inibitórias em um organismo (STEBBING, 1982). Os efeitos de hormese podem ser observados em vários tipos de organismos, como, bactérias, algas, fungos, leveduras, protozoários, culturas de células, invertebrados, vertebrados, plantas e até em humanos (STEBBING, 1982; BRITO et al., 2017).

Na agricultura, a hormese foi empregada em 1907 em estudos desenvolvidos por Jensen. O efeito hormético do uso de herbicidas foi relatado inicialmente em 1950 (MINARICK et al., 1951; BRITO et al., 2017).

A hormese é uma resposta adaptativa, caracterizada por um efeito bifásico de dose resposta, que pode ser induzido diretamente ou pode ser o resultado de uma resposta compensatória dos processos biológicos após inicial rompimento na homeostase (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

A resposta compensatória ocorre devido a pequenos níveis de estresse ou danos que resultam em desequilíbrio no organismo, ocorrem em curtos períodos de adaptação até que o organismo atinja o equilíbrio novamente. A hormese também pode ser observada sem a ocorrência de efeitos compensatórios, sendo assim, ocorre por mecanismos diretos de bio-estimulação, consistindo em resposta que opera com a manutenção das funções normais do organismo (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

Resultados de pesquisas referentes ao denominado efeito hormético foram verificados, por meio de aplicações do herbicida glyphosate e metsulfuron-methyl na cultura da cevada, que proporcionou 25% de incremento de biomassa com a aplicação de doses entre 5 – 10% da recomendada (CEDERGREEN, 2008). Segundo Brito et al. (2017), diversos autores observaram efeito de hormese após aplicação de subdoses do herbicida glyphosate nas variáveis morfológicas ou

fisiológicas em eucalipto, pinus, soja, milho, cana-de-açúcar, grão de bico e café. O crescimento das plantas estimuladas pela hormese de herbicidas pode atingir valores 100% maiores em relação ao tratamento controle, porém geralmente, a média de incremento é observada na faixa entre 20 e 30% em condições controladas e entre 10 e 25% em condições de campo (BELTZ et al., 2011).

Dentre os herbicidas que causam efeito hormético, o glyphosate é o mais estudado e utilizado atualmente (BRITO et al., 2017). O glyphosate é um herbicida não seletivo, pós-emergente de amplo espectro de ação. Seu modo de ação causa a inibição da enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs), pertencente à rota do ácido chiquímico. A aplicação deste herbicida causa acúmulo de chiquimato na planta, o que leva a uma desregulação do fluxo de carbono no vegetal e produção insuficiente de aminoácidos aromáticos essenciais ao pleno desenvolvimento das plantas, fenilalanina, tirosina e triptofano (DUKE; POWLES, 2008). Os efeitos nas plantas são diversos, como redução na síntese de ácido indolacético e de outros hormônios vegetais, redução na síntese de clorofila, fitoalexinas e lignina, redução na fotossíntese, transpiração, permeabilidade de membranas e outros (YAMADA; CASTRO, 2007).

Os fatores que influenciam a resposta estimulatória de um herbicida parecem estar ligados a padrões tais como: espécie, biótipo ou cultivar (VELINI et al., 2008), fase de crescimento da planta (CARVALHO et al., 2013), estado fisiológico, densidade de plantas ou condições ambientais (BELTZ et al., 2011). Além disso, o tipo de composto, o tempo de exposição e as medidas das variáveis podem determinar o resultado hormético (PINCELLI-SOUZA, 2014).

Os mecanismos fisiológicos que levam a hormese ainda não são conhecidos. A hormese pode ser medida no crescimento com base na massa, altura ou área foliar, ou ainda mudanças fisiológicas, como assimilação de CO₂ e condutância estomática, e também no teor de nutrientes e de proteínas. No entanto, a estimulação de uma variável não necessariamente irá indicar a estimulação de outras (BELTZ et al., 2011).

Os efeitos estimulatórios nas plantas cultivadas podem trazer benefícios para a agricultura, pelo potencial de aumentar a produtividade de culturas e a qualidade (VELINI et al., 2008). Estes efeitos são amplamente utilizados na cultura da cana-de-açúcar para aumentar a produção de sacarose, com aplicações de subdoses de glyphosate e outros químicos. Apesar disso, a aplicação de subdoses de herbicidas

não é amplamente utilizada na agricultura, principalmente pelas incertezas de reprodução dos resultados em diferentes condições ambientais (BELTZ; CEDERGREEN, 2010).

Estudos como este são de fundamental importância para a adoção do manejo desta tecnologia. A hipótese desta pesquisa é que a aplicação de subdoses de glyphosate promova alterações ao nível morfológico, fisiológico, nutricional e de produção em plantas de feijoeiro de ciclo precoce, e essas alterações sejam influenciadas pelo ambiente. Deste modo, o objetivo foi avaliar as alterações morfológicas, nutricionais, fisiológicas e na produtividade de grãos do feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate nas safras de inverno e águas.

CAPÍTULO 1

SUBDOSES DE GLYPHOSATE ALTERAM O CRESCIMENTO DO FEIJOEIRO

Fernanda Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro¹, Marcela Cristina Brunelli-Nascentes¹, Marcelo de Almeida Silva¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas. Av. Universitária, 3780, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: ferborto@yahoo.com.br

RESUMO

Subdoses de glyphosate podem estimular o crescimento das plantas. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações no crescimento do feijoeiro e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura. Foram conduzidos dois experimentos em campo e a cultivar utilizada foi a IAC Imperador, feijoeiro comum de ciclo precoce. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, constituído de doses de glyphosate aplicadas no estágio fenológico V₄, com quatro repetições. O primeiro experimento foi instalado na safra de inverno e o segundo na safra das águas. Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹), e na safra das águas os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹). Altura de plantas, área foliar, massa de matéria seca de folhas, caule e parte aérea, taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e peso específico da folha (PEF) foram avaliados. Houve estímulo do crescimento em feijoeiro de ciclo precoce com a aplicação de subdoses de glyphosate. Em ambas as safras, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou estímulo no crescimento do feijoeiro.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., hormese, morfologia, análise quantitativa de crescimento.

ABSTRACT

Glyphosate low doses can stimulate plant growth. The objective of this work was to evaluate if the application of glyphosate low doses promotes changes in common bean growth and whether these effects are influenced by the planting seasons. Two experiments were conducted in the field and the cultivar used was the IAC Imperador, common bean of early cycle. The experimental design was a randomized block design, consisting of doses of glyphosate and one season of application (phenological stage V₄), with four replications. Two experiments were carried out, the first in the winter season and the second in the water season. In the winter season, treatments consisted of five glyphosate sub-doses (0, 1.8, 7.2, 12 and 36 g of acid equivalent (a.e.) ha⁻¹), in the water season, treatments consisted of seven subdoses of glyphosate (0.8, 7.2, 12, 36, 54 and 108 g of a.e. ha⁻¹). Plant height, leaf area, leaf dry mass, stem dry mass, shoots dry mass, growth rate (GR), relative growth rate (RGR), net assimilation rate (NAR), leaf area ratio (LAR), specific leaf area (SLA), specific leaf weight (SLW) were evaluated. Glyphosate low doses resulted in growth stimulation in common bean of early cycle. In both seasons, the dose 36 g a.e. ha⁻¹ provided growth in common bean.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., hormesis, morphology, quantitative growth analysis.

1.1 Introdução

A produção mundial de feijão foi de 31,4 milhões de toneladas em 2017, com produtividade média de 862 kg ha⁻¹ e área colhida de 36,4 milhões de hectares (FAO, 2017). A principal região produtora foi a Ásia (49,0%), seguida das Américas (25,2%), África (21,7%) e Europa (3,5%) (FAO, 2017). No Brasil, a produção total de feijão na safra de 2017/18 foi de 3,1 milhões de toneladas, com área semeada de 3,2 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média total de 969 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Para a safra 2018/19, a estimativa é de 3,1 milhões de hectares de área plantada, com 1.002 kg ha⁻¹ de produtividade e produção total de 3,1 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

O cultivo do feijoeiro se estende por praticamente todo o território brasileiro, é utilizado como fonte de proteína e minerais por grande parte da população e em

países em desenvolvimento. O consumo é estimado em 14 kg hab⁻¹ ano⁻¹ no país (CONAB, 2018).

A semeadura do feijoeiro acontece em três épocas no estado de São Paulo. A primeira safra é conhecida como safra das águas e é semeada de agosto a setembro; a segunda safra ou safra da seca é semeada de janeiro a fevereiro, e na terceira safra ou safra de inverno a semeadura ocorre nos meses de abril a junho.

Atualmente, os programas de melhoramento do feijoeiro têm buscado a produção de cultivares de ciclo precoce, porém, em condições ideais de temperatura e umidade e com bom índice de precipitação, as cultivares de feijoeiro precoce produzem menos em comparação às cultivares de ciclo normal (VALE et al., 2015), sendo dependentes do manejo cultural para atingir elevado potencial produtivo. Sendo assim, é de fundamental importância o uso de tecnologias que possam melhorar a produção do feijoeiro de ciclo precoce.

A aplicação de subdoses de glyphosate pode estimular o crescimento das plantas, refletindo em aumento na altura e massa de matéria seca, que pode levar a aumento de produtividade (VELINI et al., 2010). O estímulo causado por baixas doses de um composto tóxico e a inibição em doses elevadas do mesmo composto é conhecido como hormese. Esse efeito pode ocorrer por uma estimulação direta causada pelo composto, ou pelo resultado de uma compensação que é causada por um desbalanço na homeostase do organismo (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

Foi observado efeito da aplicação de 1,8 e 18 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate na altura de plantas de cana-de-açúcar aos 25 DAA, em que a altura máxima foi obtida com a dose de 1,8 g e.a. ha⁻¹, 13% maior em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, e doses acima de 18 g e.a. ha⁻¹ reduziram o crescimento das plantas (SILVA et al., 2009). Os autores também observaram aumento na massa de matéria seca de folhas e raízes na dose 1,8 g e.a. ha⁻¹, com 81 e 44% de incremento, respectivamente. Meschede et al. (2008) observaram aumento na altura e área foliar em *Commelina benghalensis* com doses entre 2 a 24 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Nascentes et al. (2017) observaram incrementos de 29 e 35% na massa de matéria seca total de cana-de-açúcar e eucalipto, após a aplicação de glyphosate nas doses 7,8 e 7,4 g e.a. ha⁻¹, respectivamente. Os autores observaram que doses entre 5 a 9 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram incrementos na massa de matéria seca de folhas, do caule e total de cana-de-açúcar e eucalipto aos 40 DAA. Outro estudo em cana-de-açúcar demonstrou que a aplicação de doses entre 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ de

glyphosate proporcionaram aumento na massa de matéria seca, enquanto que, doses acima de 72 g e.a. ha⁻¹ provocaram redução na produção de massa de matéria seca aos 21 DAA (CARBONARI et al., 2014).

Em capim braquiária (*Brachiaria brizantha*), cultivar Marandu, foi observado estímulo na massa de matéria seca após aplicação de 10,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate aos 15 e 30 DAA, assim como aumento na altura de plantas na dose 16 g e.a. ha⁻¹ aos 15 DAA e na dose 21,3 g e.a. ha⁻¹ aos 30 DAA (NASCENTES et al., 2015).

Por outro lado, na cultura do milho não foi observada alteração na altura, AF e massa de matéria seca após aplicação de 28,8; 57,6; 86,4; 115,2 e 172,8 g ha⁻¹ de glyphosate e 8; 16; 24; 32 e 48 g ha⁻¹ de paraquat na safra 1996/97, enquanto que na safra 1997/98 foi observada redução de 49% na AF na dose 172,8 g ha⁻¹ de glyphosate, porém não houve alterações na altura e massa de matéria seca (MAGALHÃES et al., 2001a). Na cultura do sorgo não foi observada diferença significativa após aplicação de 28,8; 57,6; 86,4; 115,2 e 172,8 g ha⁻¹ de glyphosate e 8; 16; 24; 32 e 48 g ha⁻¹ de paraquat na AF e massa de matéria seca, no entanto, foi observada redução na altura de planta, principalmente nas maiores doses (MAGALHÃES et al., 2001b).

A aplicação de 1.440 e 2.880 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate em café proporcionou reduções na altura de plantas, AF, número de folhas e massa de matéria seca de caule e folhas, por outro lado, a aplicação de doses entre 416 a 738 g e.a. ha⁻¹ incrementaram o crescimento da cultura (CARVALHO et al., 2013). Velini et al. (2008) observaram redução no crescimento de soja convencional após aplicação de doses entre 72 e 720 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, no entanto, a aplicação de doses entre 1,8 a 18 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram maior crescimento.

O efeito estimulatório no crescimento das plantas pode ser passageiro, dependendo das condições ambientais e do mecanismo que provocou o efeito de hormese (BELTZ, CEDERGREEN, 2010). O efeito de hormese no crescimento das culturas pode induzir aumento de produtividade apenas se o estímulo ocorrer no tempo certo, pois o efeito de hormese é limitado (BELTZ et al., 2011).

Cedergreen (2008) observou aumento na massa de matéria seca de cevada, porém este aumento não refletiu em aumento na produtividade. Em contrapartida, Abbas et al. (2015) observaram aumento na altura e massa de matéria seca em grão de bico (*Cicer arietinum* L.), com aumento na produtividade de grãos. E Cedergreen

et al. (2009) observaram aumento na produtividade de cevada, mesmo sem terem observado aumento na massa de matéria seca das plantas.

O glyphosate é o único herbicida que atua bloqueando a enzima 5-enolpiruvil chiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs), possui ação sistêmica e não seletiva, o bloqueio da enzima leva ao bloqueio na produção de aminoácidos aromáticos essenciais as plantas, causando desbalanço no fluxo de carbono no vegetal.

Ainda não se sabe o que leva ao estímulo no crescimento das culturas tratadas com subdoses de glyphosate, porém, vários são os fatores que podem alterar o efeito de hormese, como a cultura avaliada (VELINI et al., 2008), as condições ambientais, como temperatura, radiação solar e concentração de CO₂ (BELTZ, 2008; BELTZ, CEDERGREEN, 2010; CEDERGREEN, OLESEN, 2010) e a fase fenológica da cultura (SILVA et al., 2016).

Silva et al. (2016) observaram redução na massa de matéria seca de feijoeiro após aplicação de 3, 6, 9, 12 e 15 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, para todas as doses aplicadas e em todas as épocas de aplicação (fase fenológica: V₄₋₄, V₄₋₇ e parcelada em V₄₋₄ e em V₄₋₇). Por outro lado, Rabelo et al. (2012) observaram aumento na massa de matéria seca de folhas, de parte aérea e no número de folhas do feijoeiro após a aplicação de 4,3 a 12,9 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Em outro estudo com feijoeiro, não foi observado efeito da aplicação de 10, 20, 30 e 40 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate na altura de plantas nos cultivares Carioca, Juriti e Pérola (SILVA et al., 2012a).

Cedergreen (2008) observou maior velocidade de crescimento em cevada após aplicação de subdoses de glyphosate, com aumento na taxa de crescimento da cultura, o mesmo foi observado por Nascentes et al. (2015) em capim braquiária (*Brachiaria brizantha*) cultivar Marandu.

A hipótese foi, pode ocorrer alteração no crescimento do feijoeiro após a aplicação de subdoses de glyphosate, e que as respostas da cultura podem variar em função da época do ano de cultivo. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações no crescimento do feijoeiro e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura.

1.2 Material e métodos

1.2.1 Descrição da área experimental

Os experimentos foram conduzidos em campo, na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas FCA/UNESP, localizada no município de Botucatu (22°51'01" latitude Sul e 48°25'55" longitude Oeste e altitude 800,1 m), Estado de São Paulo, Brasil. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico), com chuvas de verão e seca no inverno, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2013).

Na safra de inverno o pH do solo estava 4,7, matéria orgânica 21 g dm⁻³, 57 g dm⁻³ de P, com 5; 84; 2,6; 40 e 11 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 53 mmol dm⁻³, CTC de 137 mmol dm⁻³ e V% 39, 0,55; 6,5; 60; 20,2 e 1,6 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente. Na safra das águas, o pH estava 4,7, 28 g dm⁻³ de M.O, 57 g dm⁻³ de P, com 4; 76; 2,7; 33 e 10 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 46 mmol dm⁻³, CTC de 122 mmol dm⁻³ e V% 37, 0,56; 8,6; 33; 60,5 e 4,7 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente.

Os dados climáticos de temperatura e precipitação durante o período experimental foram coletados da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, campus de Botucatu – SP.

1.2.2 Material vegetal

A cultivar utilizada foi a IAC Imperador, caracterizada por hábito de crescimento determinado, porte de planta semi-ereto, ciclo precoce, em torno de 60-75 dias, possui flores brancas. Os grãos são classificados no grupo comercial Carioca, é de cor bege clara com listras marrons claras, com cerca de 21% de proteína, possui massa de mil grãos de 270 gramas e potencial produtivo de 4.600 kg ha⁻¹. É recomendado para a semeadura no estado de São Paulo, Brasil, para as três épocas de cultivo (águas, seca e inverno). É resistente ao fungo *Fusarium oxysporum* e a algumas raças do fungo *Colletotrichum lindemuthianum*, causador da antracnose (IAC, 2018).

1.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

Dois experimentos foram realizados, na safra de inverno e na safra das águas, ambos no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições.

Cada parcela experimental possuía 10 metros de comprimento, com cinco linhas, espaçamento entre linhas de 0,45 m, utilizando-se de 10 a 12 sementes por metro.

Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha^{-1}) e na safra das águas, os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha^{-1}). Os tratamentos foram aplicados no estágio fenológico V₄ da cultura, em ambos os experimentos.

1.2.4 Condução do experimento e aplicação dos tratamentos

A semeadura do feijoeiro na safra de inverno ocorreu no dia 31 de março de 2016 e na safra das águas no dia 30 de agosto de 2016.

A adubação de semeadura foi baseada na análise de solo e no Boletim 100 (AMBROSANO et al., 1996), foram utilizados 150 kg ha^{-1} de 8-28-16 (NPK) em ambos os experimentos.

Na ausência de chuvas, irrigação suplementar por aspersão foi utilizada para o suprimento adequado de água à cultura. Durante a condução dos experimentos o controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado segundo as recomendações técnicas para a cultura na região.

Em ambos os experimentos, 20 dias após a semeadura (DAS) foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura, com aplicação de 40 kg ha^{-1} de sulfato de amônio.

A aplicação dos tratamentos ocorreu em 04 de maio de 2016 na safra de inverno (34 DAS), as condições climáticas foram temperatura média de 19,17°C, com temperatura máxima de 25,21°C, temperatura mínima de 14,98°C, umidade relativa de 69,81, com ausência de ventos. E em 08 de outubro de 2016 na safra das águas (39 DAS) as condições climáticas foram temperatura média de 20,08°C, com temperatura máxima de 28,43°C, temperatura mínima de 12,85°C, umidade relativa de 61,68, com ausência de ventos. Em ambos os experimentos houve precipitação no quarto dia após a aplicação dos tratamentos.

A aplicação do glyphosate foi realizada por meio de um pulverizador costal pressurizado (CO_2), com barra de pulverização com cinco pontas de latão tipo Magnum defletor 0,50, volume de calda de 200 L ha^{-1} e pressão de aplicação de 2 bar. Foi utilizado o herbicida Roundup® original, com composição de equivalente

ácido de N-(fosfonometil) glicina (360 g L^{-1}), sal de isopropilamina (480 g L^{-1}) e ingredientes inertes (684 g L^{-1}).

1.2.5 Variáveis avaliadas

Na safra de inverno as avaliações ocorreram aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA), na safra das águas ocorreu aos 5, 12, 19 e 33 DAA. Para cada avaliação foram utilizadas as duas linhas centrais da parcela.

1.2.5.1 Altura de planta

A altura de plantas foi determinada com auxílio de uma fita métrica e as medidas foram realizadas em dez plantas coletadas dentro da área útil de cada unidade experimental, com resultados expressos em cm.

1.2.5.2 Área foliar

Área foliar (AF) foi determinada por amostragem, seguindo metodologia de Benincasa (2003), com modificações. Após a separação das folhas, foram retirados dez discos foliares de área conhecida de cada planta, que foi considerada a área foliar da amostra (AF amostra). Em seguida, após a secagem em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65°C , até atingirem massa constante (48 horas), foi determinada a massa seca da amostra (MS amostra) e a massa seca das folhas restantes (MSF). A área foliar total (AF) foi obtida através da equação 1, com resultados expressos em dm^2 .

$$AF = [(AF \text{ amostra} \times MSF / MS \text{ amostra})] \quad (1)$$

Em que, AF amostra é a área foliar conhecida, MSF é a massa seca de folhas da amostra + restantes e MS amostra é a massa seca da amostra.

1.2.5.3 Massa de matéria seca de folhas, caule e de parte aérea

Após as medidas realizadas no campo, as plantas foram cortadas, separando-se folhas e caule. O material foi submetido à secagem em estufa a 65°C , por 72 horas. Em seguida, a massa do material seco de caules e folhas de cada parcela foi obtida em balança de precisão, com resultados expressos em gramas por planta.

1.2.5.4 Taxa de crescimento da cultura

Os dados de massa de matéria seca de folha, caule e parte aérea foram utilizados para determinar a taxa de crescimento da cultura (TCC, g dia⁻¹), conforme equação 2:

$$TCC = (MS2 - MS1) / t_2 - t_1 \quad (2)$$

Em que MS1 e MS2 referem-se à massa de matéria seca na primeira e segunda época de avaliação, e $t_2 - t_1$ ao tempo em dias na primeira e segunda época de avaliação.

1.2.5.5 Taxa de crescimento relativo

A taxa de crescimento relativo (TCR, g g⁻¹ dia⁻¹) foi obtida por meio da equação 3:

$$TCR = (\ln MS2 - \ln MS1) / t_2 - t_1 \quad (3)$$

Onde, $\ln MS1$ e $\ln MS2$ referem-se ao logaritmo neperiano da massa de matéria seca da primeira e segunda época de avaliação, e $t_2 - t_1$ ao tempo em dias na primeira e segunda época de avaliação.

1.2.5.6 Taxa de assimilação líquida

A taxa de assimilação líquida (TAL, g dm⁻² dia⁻¹) foi obtida através da equação 4:

$$TAL = (b + 2ct) * a * e^{(bt + ct^2)} / (a_1 * e^{(b_1 + c_1 t^2)}) \quad (4)$$

Em que, a, b, e, c são constantes e t é o tempo.

1.2.5.7 Razão de área foliar

A razão de área foliar (RAF, dm² g⁻¹) foi obtida por meio da equação 5:

$$RAF = AF / MSPA \quad (5)$$

Onde, AF refere-se à área foliar total da planta e a MSPA à massa de matéria seca de parte aérea.

1.2.5.8 Área foliar específica

A área foliar específica (AFE, $\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$) foi obtida pela equação 6:

$$\text{AFE} = \text{AF} / \text{MSF} \quad (6)$$

Em que, AF refere-se à área foliar total e MSF à massa de matéria seca de folhas.

1.2.5.9 Peso específico da folha

O peso específico da folha (PEF, $\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$) reflete a espessura da folha (BENINCASA, 2003) e foi obtida pela equação 7:

$$\text{PEF} = 1 / \text{AFE} \quad (7)$$

Onde, AFE refere-se à área foliar específica.

1.2.6 Análise estatística

Os dados medidos foram submetidos à análise de variância sendo suas médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade e ajustados por meio de análise de regressão.

Para se proceder à estimativa dos índices fisiológicos taxa de crescimento da cultura (TCC), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE) e peso específico (PE), os dados de massa de matéria seca de parte aérea, folhas e área foliar foram ajustados em função do tempo por equação exponencial quadrática, representativa da curva de crescimento de espécies de ciclo curto.

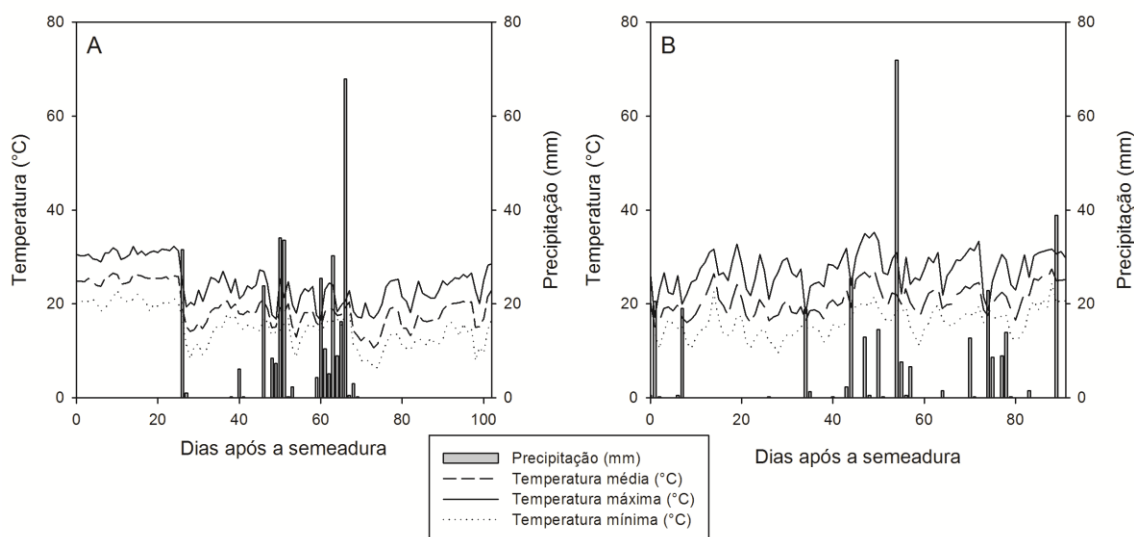
1.3 Resultados

1.3.1 Condições climáticas

Durante o experimento na safra de inverno, a temperatura média do ar variou de 10,6 a 26,5°C, a temperatura média no período foi de 19,2°C, e a precipitação total

de 321,0 mm (Figura 1). Na safra das águas, a temperatura média do ar variou de 9,5 a 35,2°C, com temperatura média de 22,3°C, e a precipitação total de 313,4 mm. A safra de inverno ocorre no período de outono-inverno, o qual é caracterizado por menor comprimento do dia, e assim, menos incidência de radiação solar, enquanto que, a safra das águas ocorre no período de inverno-primavera, é caracterizada pelo aumento no comprimento dos dias, e assim, aumento da incidência de radiação solar.

Figura 1 – Temperatura do ar mínima, média e máxima e precipitação durante o período experimental de março a julho de 2016, safra de inverno (A) e agosto a dezembro de 2016, safra das águas (B). Botucatu – SP, 2016.



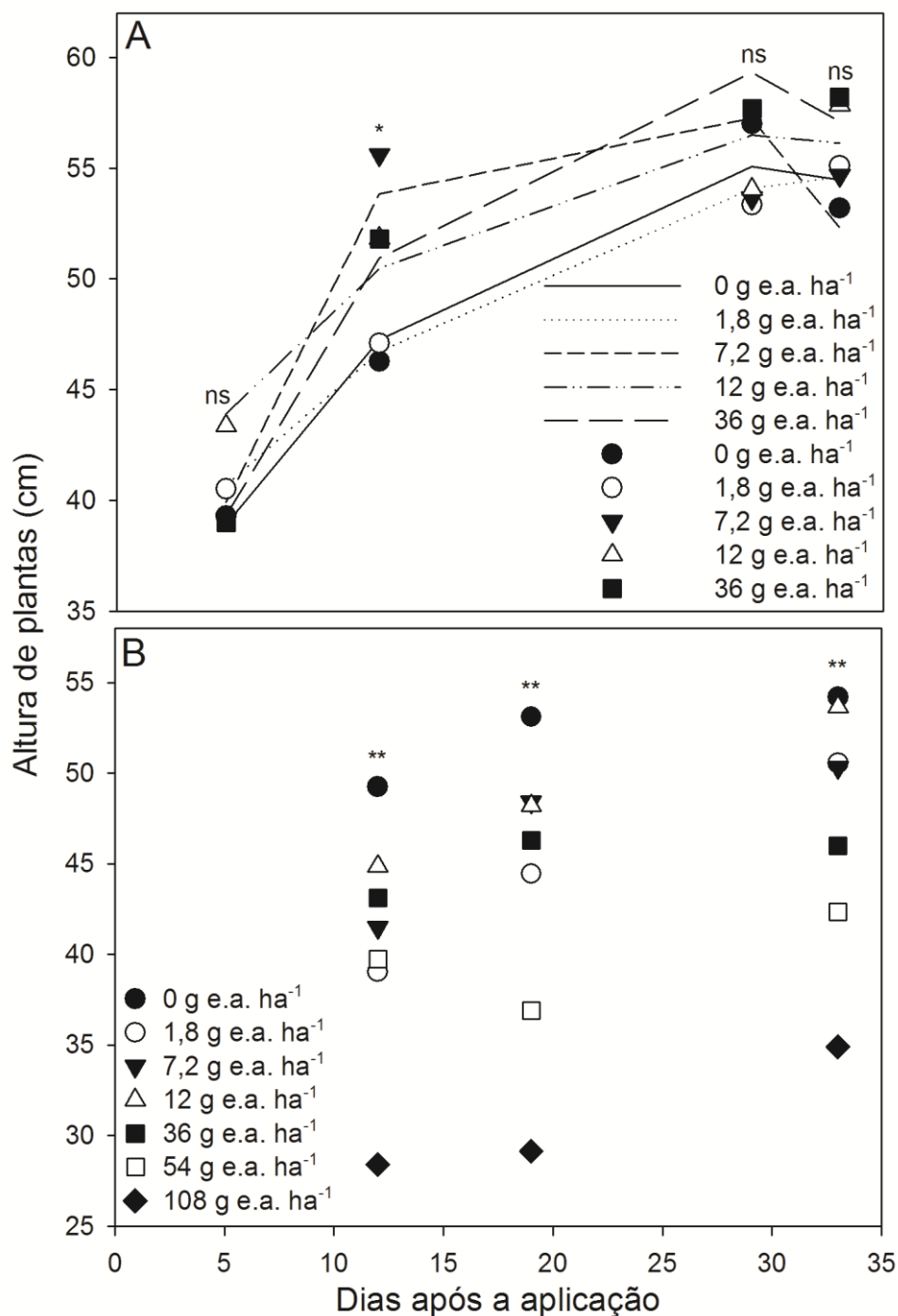
1.3.2 Altura de plantas

Na safra de inverno, aos 13 DAA, a dose de 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou a maior altura para o feijoeiro, de 55,60 cm, correspondendo a 20% de incremento em comparação a dose 0 g e.a. ha⁻¹ (Figura 2A). Não houve diferença na altura de plantas entre os tratamentos até o final das avaliações.

Na safra das águas, a maior altura de plantas foi observada na dose 0 g e.a. ha⁻¹ e a menor na dose 108 g e.a. ha⁻¹, com 36% de redução (Figura 2B).

As plantas apresentaram aumento na altura até 33 DAA em ambas as safras, com altura máxima de 58,2 cm na safra de inverno e 54,2 cm na safra das águas.

Figura 2 – Altura de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$.

A: 0 g e.a. ha⁻¹: $y = (33,1088) \cdot \exp((0,0353)x + (-0,0006)x^2)$, r^2 : 0,971. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y = (36,4936) \cdot \exp((0,0234)x + (-0,0003)x^2)$, r^2 : 0,993. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y = (30,4608) \cdot \exp((0,0607)x + (-1,3458)x^2)$, r^2 : 0,903. 12 g e.a. ha⁻¹: $y = (39,1472) \cdot \exp((0,0251)x + (-0,0004)x^2)$, r^2 : 0,918. 36 g e.a. ha⁻¹: $y = (31,4217) \cdot \exp(0,0495x + (-0,0009)x^2)$, r^2 : 0,985.

1.3.3 Área foliar

Na safra de inverno, nas plantas tratadas com as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ foi observado redução na AF em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, com reduções de 22 e 14%, respectivamente, porém houve aumento contínuo na AF até 33 DAA para estas doses.

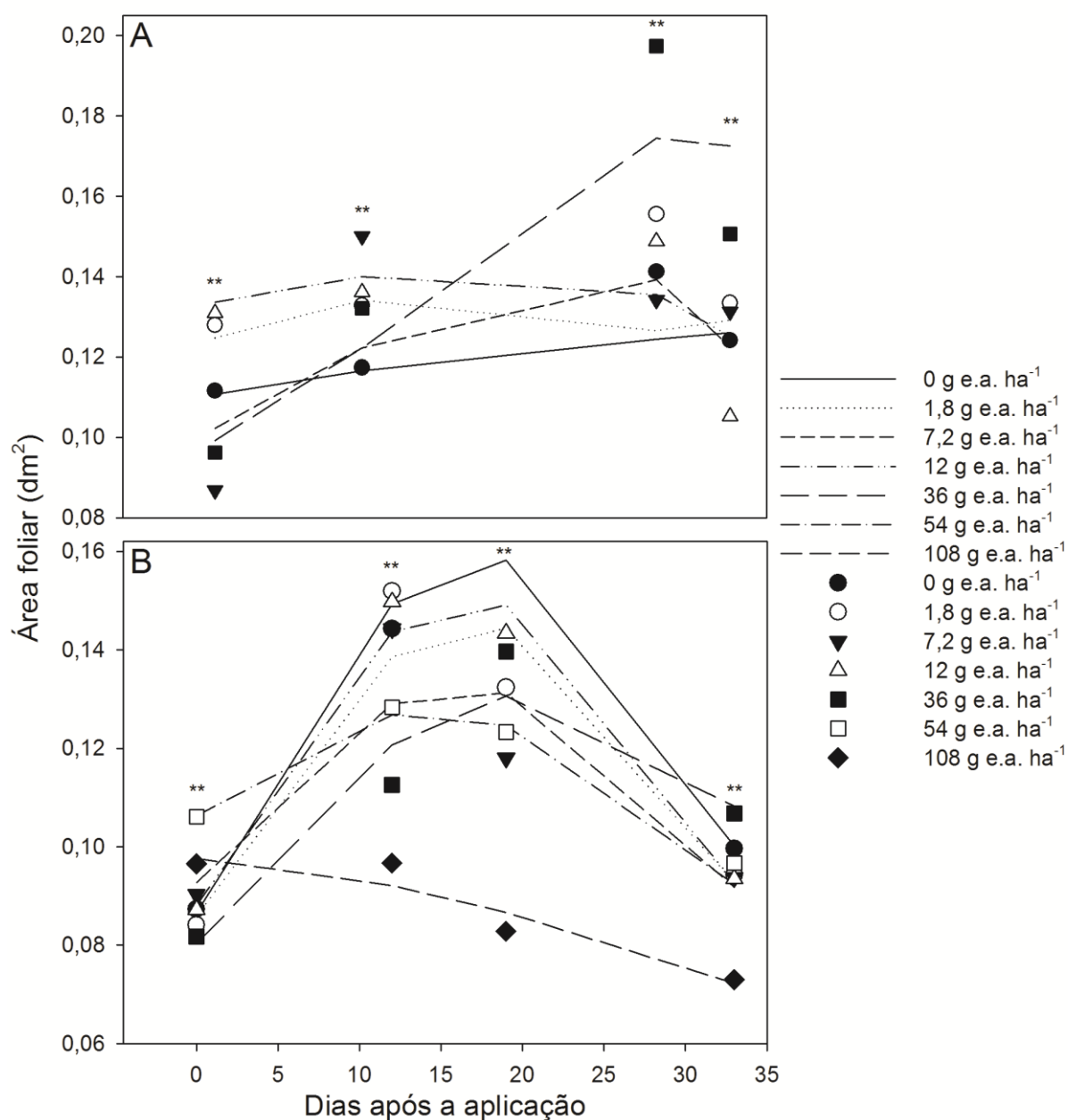
Nas doses 1,8 e 12 g e.a. ha⁻¹ foi observado maior AF em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹ aos 5 DAA, correspondendo a 0,1278 e 0,1309 dm², representando incrementos de 15 e 17%, respectivamente. A dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumento contínuo da AF até 33 DAA, enquanto, a dose 12 g e.a. ha⁻¹, redução (Figura 3A).

Aos 33 DAA a maior AF foi observada na dose 36 g e.a. ha⁻¹, de 0,1506 dm², correspondendo ao aumento de 21%, e a menor AF foi na dose 12 g e.a. ha⁻¹, de 0,1051 dm².

Na safra das águas, as plantas apresentaram aumento contínuo na AF até 19 DAA, com redução aos 33 DAA (Figura 3B). Aos 5 DAA foi observado maior valor de AF na dose 54 g e.a. ha⁻¹, 21% maior em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,1060 dm².

Aos 33 DAA, a AF não diferiu significativamente para as doses 0; 1,8; 7,2; 12; 36 e 54 g e.a. ha⁻¹, enquanto que a dose 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou a menor AF, de 0,729 dm², representando redução de 27%.

Figura 3 – Área foliar de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



** P≤0,01.

A: 0 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,1058)*\exp((0,0096)x+(-0,0001)x^2)$, r^2 : 0,329. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,1153)*\exp((0,0177)x+(-0,0004)x^2)$, r^2 : 0,627. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y=(8,5825e-02)*\exp((0,0387)x+(-0,0007)x^2)$, r^2 : 0,411. 12 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,1259)*\exp((0,0139)x+(-0,0430)x^2)$, r^2 : 0,737. 36 g e.a. ha⁻¹: $y=(7,6068e-02)*\exp((0,0582)x+(-0,0010)x^2)$, r^2 : 0,843.

B: 0 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0866)*\exp((0,0687)x+(-0,0019)x^2)$, r^2 : 0,991. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0859)*\exp((0,0612)x+(-0,0017)x^2)$, r^2 : 0,927. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0926)*\exp((0,0434)x+(-0,0019)x^2)$, r^2 : 0,826. 12 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0880)*\exp((0,0631)x+(-0,0018)x^2)$, r^2 : 0,985. 36 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0803)*\exp((0,0480)x+(-0,0011)x^2)$, r^2 : 0,933. 54 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,1062)*\exp((0,0254)x+(-0,0009)x^2)$, r^2 : 0,995. 108 g e.a. ha⁻¹: $y=(0,0975)*\exp((-0,0024)x+(-0,0002)x^2)$, r^2 : 0,917.

1.3.4 Massa de matéria seca de folhas

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate proporcionaram aumento na massa de matéria seca de folhas, no entanto, somente a dose 36 g e.a. ha⁻¹ sustentou maior massa de matéria seca de folhas até 33 DAA (Figura 4A). As plantas apresentaram aumento contínuo nos valores até 29 DAA, com redução aos 33 DAA.

Aos 5 DAA, os maiores valores de massa de matéria seca de folhas foram de 3,66 e 3,58 g planta⁻¹, observados nas doses 1,8 e 12 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a incrementos de 29 e 27%, respectivamente.

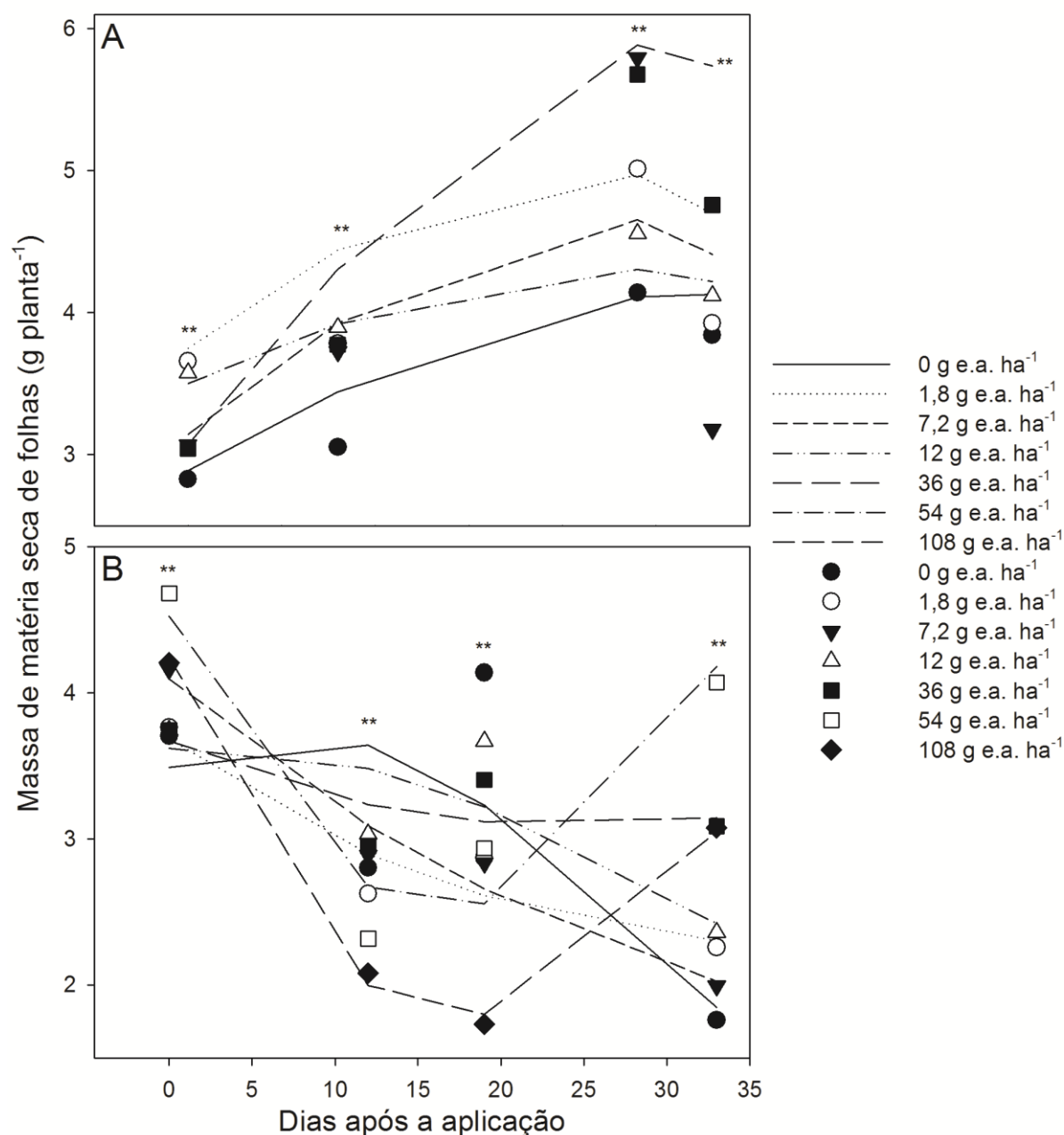
Aos 33 DAA, a aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou o maior aumento, 24%, e o maior valor, de 4,76 g planta⁻¹, e o menor valor, de 3,18 g planta⁻¹, foi observado na dose de 7,2 g e.a. ha⁻¹, correspondendo à redução de 17%.

Na safra das águas, as subdoses de glyphosate proporcionaram redução na massa de matéria seca de folhas em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹ até 19 DAA (Figura 4B).

Aos 5 DAA, o maior valor de massa de matéria seca de folhas foi observado na dose 54 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 4,68 g planta⁻¹, com aumento de 29%

Aos 33 DAA foi observado aumento nas plantas tratadas com a dose 54 g e.a. ha⁻¹, com valor de 4,07 g planta⁻¹, correspondendo ao maior valor, representando incremento de 131% em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, seguida das doses 36 e 108 g e.a. ha⁻¹, com aumentos de 75 e 74%, respectivamente. O menor valor, de 1,76 g planta⁻¹, foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹.

Figura 4 – Massa de matéria seca de folhas de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



** P≤0,01.

A: 0 g e.a. ha⁻¹: $y=(2,4651)*\exp((0,0347)x+(-0,0005)x^2)$, r^2 : 0,397. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,1724)*\exp((0,0372)x+(-0,0007)x^2)$, r^2 : 0,368. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y=(2,5332)*\exp((0,0478)x+(-0,0009)x^2)$, r^2 : 0,512. 12 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,1419)*\exp((0,0239)x+(-0,0004)x^2)$, r^2 : 0,771. 36 g e.a. ha⁻¹: $y=(2,2394)*\exp((0,0693)x+(-0,0012)x^2)$, r^2 : 0,709.

B: 0 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,4886)*\exp((0,0165)x+(-0,0010868)x^2)$, r^2 : 0,687. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,6826)*\exp((-0,0233)x+(0,0002)x^2)$, r^2 : 0,857. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y=(4,0954)*\exp((-0,0247)x+(0,0001)x^2)$, r^2 : 0,967. 12 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,6199)*\exp((0,0018)x+(-0,0004)x^2)$, r^2 : 0,720. 36 g e.a. ha⁻¹: $y=(3,6701)*\exp((-0,0138)x+(0,0002)x^2)$, r^2 : 0,507. 54 g e.a. ha⁻¹: $y=(4,5236)*\exp((-0,0676)x+(0,0019)x^2)$, r^2 : 0,863. 108 g e.a. ha⁻¹: $y=(4,2401)*\exp((-0,0928)x+(0,0025)x^2)$, r^2 : 0,993.

1.3.5 Massa de matéria seca de caule

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate proporcionaram aumento na massa de matéria seca do caule, porém, somente a dose 36 g e.a. ha⁻¹ sustentou maior massa até 33 DAA (Figura 5A). As plantas tratadas com as doses 0; 1,8 e 12 g e.a. ha⁻¹ apresentaram aumento contínuo na massa até 29 DAA e redução aos 33 DAA. As plantas tratadas com as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ tiveram aumento contínuo na massa até 33 DAA.

Aos 5 DAA, a aplicação da dose 12 g e.a. ha⁻¹ proporcionou o maior valor de massa de matéria seca de caule, de 3,36 g planta⁻¹, com incremento de 46%, em seguida a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ proporcionou de 20%.

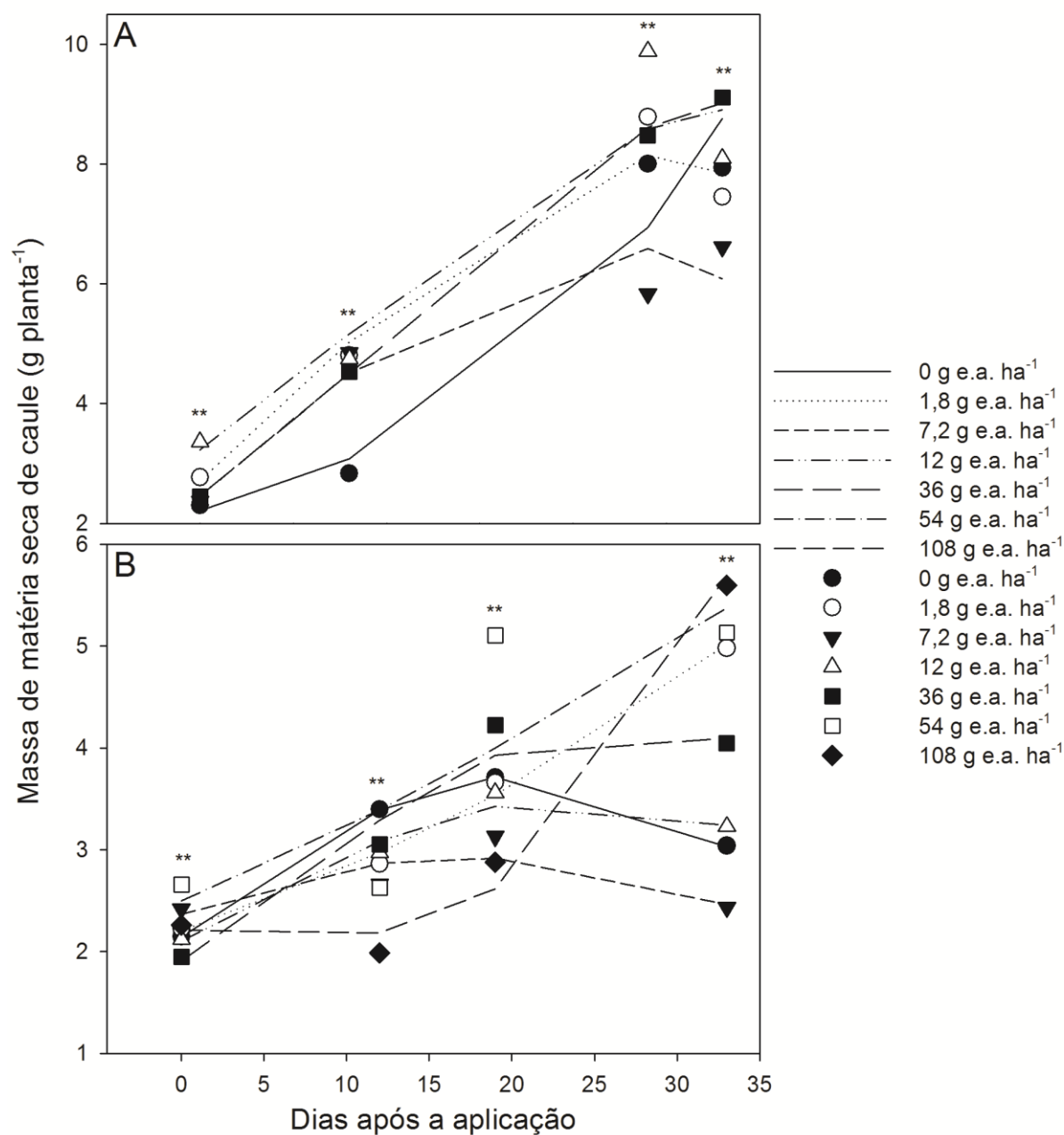
Após 33 DAA, a aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹ aumentou em 15% a massa seca de caule, de 9,11 g planta⁻¹ (Figura 5A). O menor valor foi observado na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹, com redução de 17%.

Na safra das águas, as subdoses de glyphosate proporcionaram redução na massa de matéria seca do caule em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, principalmente na dose 108 g e.a. ha⁻¹, porém o acúmulo de massa foi retomado, com aumento até 33 DAA para as doses 1,8; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ (Figura 5B). As plantas tratadas com as doses 0; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ tiveram aumento na massa até 19 DAA e redução aos 33 DAA.

Aos 5 DAA, o maior valor de massa de matéria seca de caule foi verificado na dose 54 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 2,65 g planta⁻¹, e 24% de aumento (Figura 5B). O menor valor foi na dose 36 g e.a. ha⁻¹, porém não diferiu significativamente das doses 0; 1,8; 12 e 108 g e.a. ha⁻¹.

Aos 33 DAA, a aplicação das doses 1,8; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram os maiores valores, de 4,98; 5,13 e 5,59 g planta⁻¹ respectivamente, correspondendo a aumentos de 64, 69 e 84%, respectivamente, e o menor valor foi observado na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹.

Figura 5 – Massa de matéria seca de caule de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



** P ≤ 0,01.

A: 0 g e.a. ha⁻¹: $y = (1,8368) \cdot \exp((0,0349)x + (0,0003)x^2)$, r^2 : 0,970. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y = (1,6217) \cdot \exp((0,1124)x + (-0,0019)x^2)$, r^2 : 0,985. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y = (1,4547) \cdot \exp((0,1154)x + (-0,0021)x^2)$, r^2 : 0,955. 12 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,2354) \cdot \exp((0,0791)x + (-0,0011)x^2)$, r^2 : 0,948. 36 g e.a. ha⁻¹: $y = (1,5355) \cdot \exp((0,1015)x + (-0,0014)x^2)$, r^2 : 0,999.

B: 0 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,1405) \cdot \exp((0,0540)x + (-0,0013)x^2)$, r^2 : 0,999. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,2008) \cdot \exp((0,0248)x + (0,0001)x^2)$, r^2 : 0,992. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,3684) \cdot \exp((0,0242)x + (-0,0006)x^2)$, r^2 : 0,752. 12 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,1012) \cdot \exp((0,0427)x + (-0,0008)x^2)$, r^2 : 0,980. 36 g e.a. ha⁻¹: $y = (1,9058) \cdot \exp((0,0582)x + (-0,0010)x^2)$, r^2 : 0,970. 54 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,4946) \cdot \exp((0,0268)x + (-0,0001)x^2)$, r^2 : 0,700. 108 g e.a. ha⁻¹: $y = (2,2088) \cdot \exp((-0,0179)x + (0,0014)x^2)$, r^2 : 0,970.

1.3.6 Massa de matéria seca de parte aérea

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate aumentaram a massa de matéria seca de parte aérea das plantas, porém, somente a dose 36 g e.a. ha⁻¹ sustentou maior massa até 33 DAA (Figura 6A). As plantas cresceram continuamente até 29 DAA, com redução aos 33 DAA.

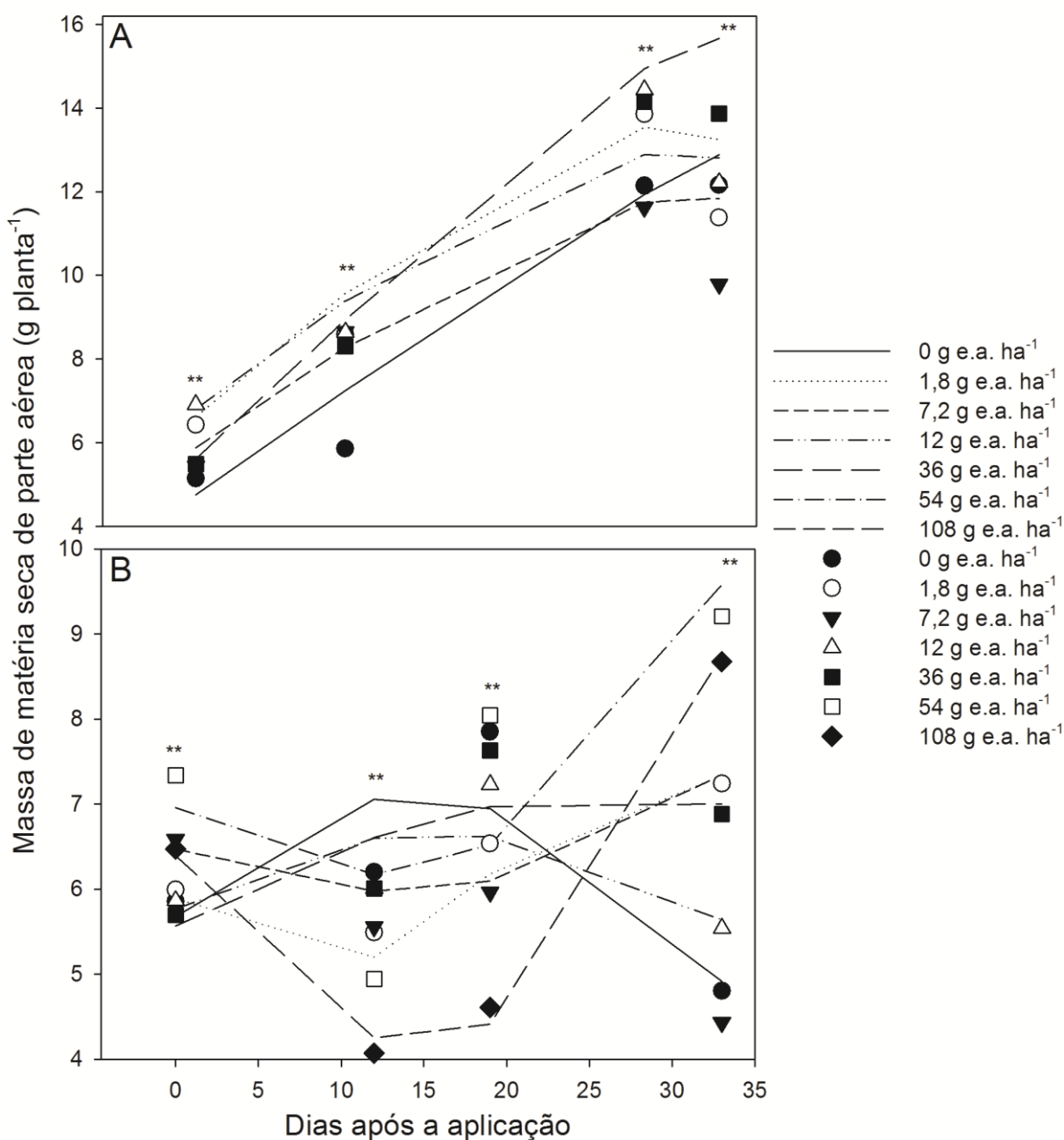
Aos 5 DAA, a aplicação das doses 1,8 e 12 g e.a. ha⁻¹ proporcionou os maiores valores, de 6,43 e 6,91 g planta⁻¹, correspondendo a aumentos de 25 e 34%, respectivamente.

Aos 33 DAA, a aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou incremento de 14%, correspondendo ao maior valor observado (13,86 g planta⁻¹), enquanto que, a aplicação da dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 19%.

Na safra das águas, as doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram redução na massa de matéria seca de parte aérea, com retomada na produção de massa até 33 DAA (Figura 6B). As plantas cresceram continuamente até 19 DAA, com redução na massa aos 33 DAA.

Aos 5 DAA, foi observado maior valor na dose 54 g e.a. ha⁻¹, com 7,33 g planta⁻¹, o que corresponde ao aumento de 25%. Aos 33 DAA foram observados aumentos após aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, de 92 e 81%, correspondendo a 9,20 e 8,67 g planta⁻¹, respectivamente, enquanto que a aplicação da dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 8% (Figura 6B).

Figura 6 – Massa de matéria seca de parte aérea de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



** $P \leq 0,01$.

A: 0 g e.a. ha⁻¹: $y = (3,2691) \cdot \exp((0,0805)x + (-0,0011)x^2)$, r^2 : 0,907. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y = (4,6899) \cdot \exp((0,0754)x + (-0,0013)x^2)$, r^2 : 0,756. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y = (4,2941) \cdot \exp((0,0683)x + (-0,0011)x^2)$, r^2 : 0,841. 12 g e.a. ha⁻¹: $y = (5,0459) \cdot \exp((0,0652)x + (-0,0011)x^2)$, r^2 : 0,873. 36 g e.a. ha⁻¹: $y = (3,6905) \cdot \exp((0,0908)x + (-0,0014)x^2)$, r^2 : 0,913.

B: 0 g e.a. ha⁻¹: $y = (5,6755) \cdot \exp((0,0309)x + (-0,0010)x^2)$, r^2 : 0,730. 1,8 g e.a. ha⁻¹: $y = (5,8856) \cdot \exp((-0,0031)x + (0,0002)x^2)$, r^2 : 0,742. 7,2 g e.a. ha⁻¹: $y = (6,4678) \cdot \exp((-0,0126)x + (0,0004)x^2)$, r^2 : 0,707. 12 g e.a. ha⁻¹: $y = (5,7626) \cdot \exp((0,0181)x + (-0,0005)x^2)$, r^2 : 0,562. 36 g e.a. ha⁻¹: $y = (5,5635) \cdot \exp((0,0184)x + (-0,0003)x^2)$, r^2 : 0,655. 54 g e.a. ha⁻¹: $y = (6,9587) \cdot \exp((-0,0213)x + (0,0009)x^2)$, r^2 : 0,543. 108 g e.a. ha⁻¹: $y = (6,3922) \cdot \exp((-0,0589)x + (0,0020)x^2)$, r^2 : 0,988.

1.3.7 Taxa de crescimento da cultura

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate proporcionaram maior TCC, porém este aumento não continuou até 33 DAA, no qual a dose 0 g e.a. ha⁻¹ foi significativamente maior (Figura 7A).

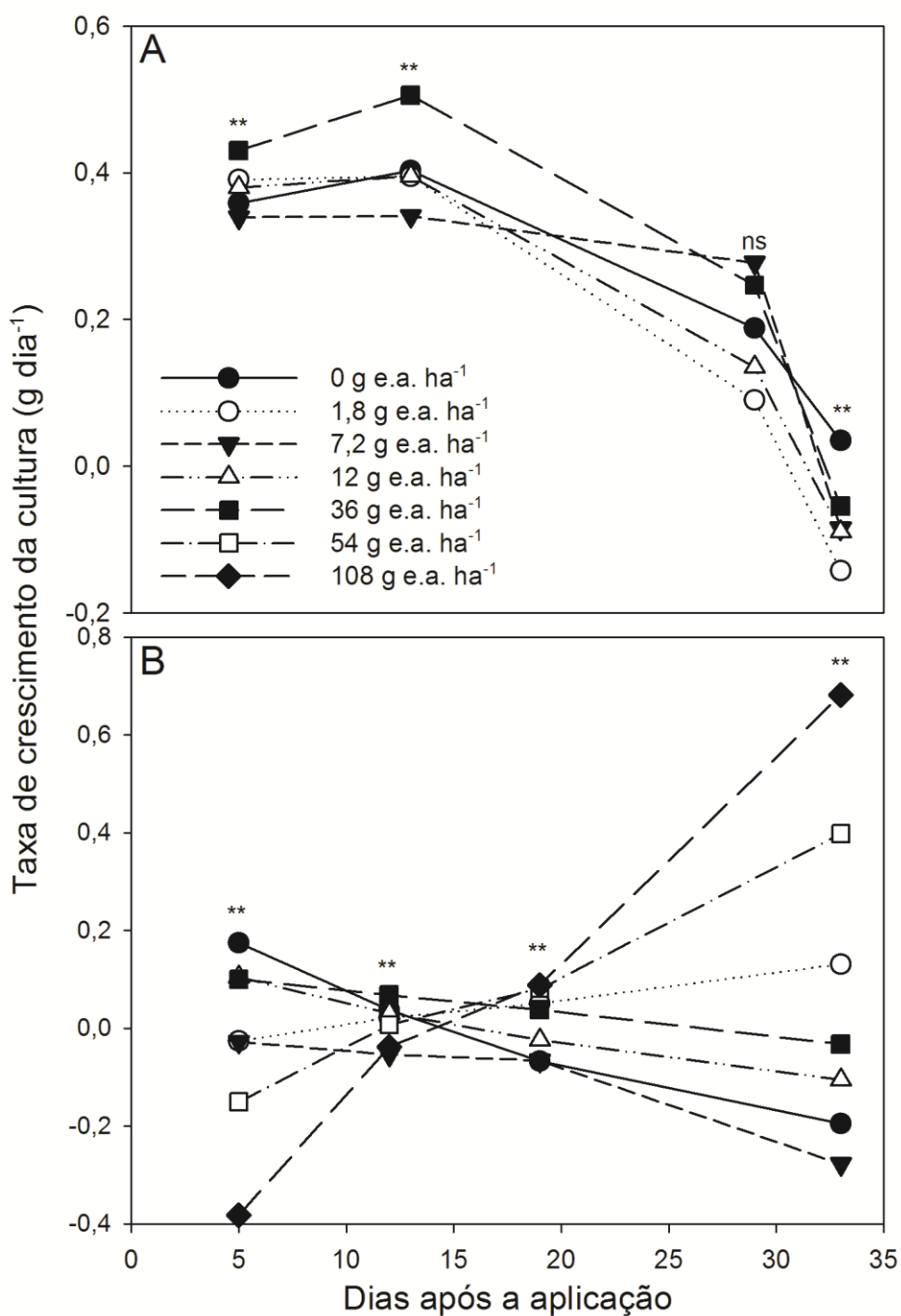
Aos 5 DAA, as plantas tratadas com as doses de 1,8 e 36 g e.a. ha⁻¹ tiveram incrementos de 24 e 29%, respectivamente, correspondendo a 0,4098 e 0,4282 g dia⁻¹. Aos 33 DAA, o maior valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, de 0,0989 g dia⁻¹, e as plantas tratadas com as doses 1,8; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ tiveram redução na TCC.

Na safra das águas, as subdoses de glyphosate causaram redução na taxa de crescimento da cultura, principalmente nas doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, com retomada na TCC aos 33 DAA (Figura 7B).

Aos 5 DAA, o maior valor de TCC foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,1746 g dia⁻¹, não diferindo da dose 12 e 36 g e.a. ha⁻¹. O menor valor foi observado na dose 108 g e.a. ha⁻¹, com redução de 119%.

Aos 33 DAA, as plantas tratadas com a dose 108 g e.a. ha⁻¹ tiveram incremento de 349%, correspondendo a 0,6818 g dia⁻¹, enquanto que, a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou menor TCC, com redução de 42% (Figura 7B).

Figura 7 – Taxa de crescimento da cultura de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

1.3.8 Taxa de crescimento relativo

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate, com exceção da dose 36 g e.a. ha⁻¹, proporcionaram redução na TCR até 33 DAA (Figura 8A). As plantas apresentaram redução contínua da TCR até 33 DAA.

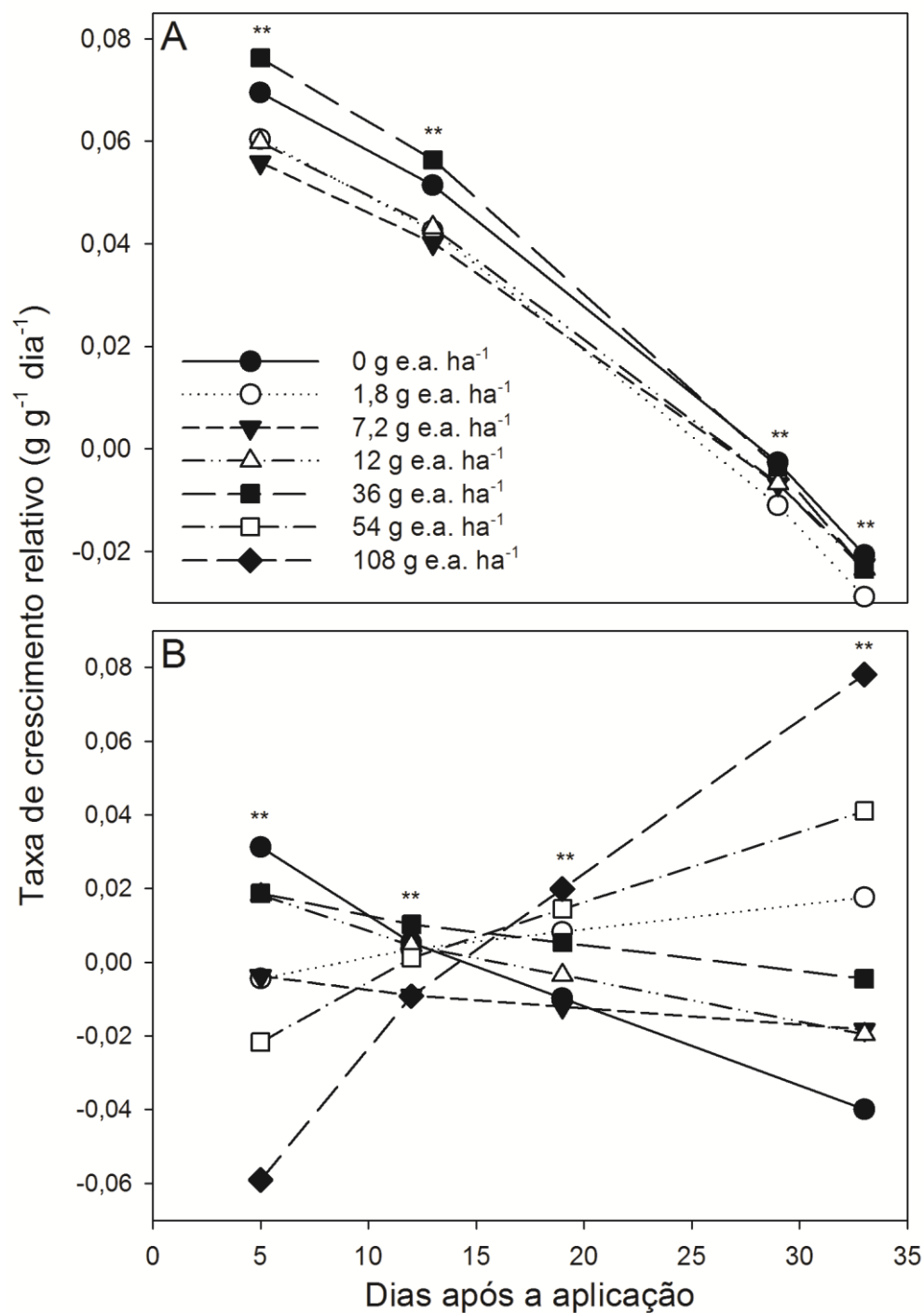
Aos 5 DAA, a aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou o maior valor de TCR, de 0,0769 g g⁻¹ dia⁻¹, com aumento de 10%, porém não diferiu em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, e o menor valor foi observado nas plantas tratadas com as doses 7,2 e 12 g e.a. ha⁻¹, com reduções de 19 e 23%, respectivamente.

Enquanto aos 33 DAA, o maior valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,0022 g g⁻¹ dia⁻¹, e o menor valor nas plantas tratadas com a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹, com redução de 468% (Figura 8A).

Na safra das águas, as doses 1,8; 7,2; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram redução na TCR. As plantas tratadas com as doses 1,8; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ retomaram o crescimento aos 33 DAA (Figura 8B). As plantas tratadas com as doses 0; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ reduziram o TCR até 33 DAA.

Aos 5 DAA, o maior valor foi observado na dose 0; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,0312; 0,0183 e 0,0186 g g⁻¹ dia⁻¹. O menor valor foi observado na dose 108 g e.a. ha⁻¹ (-0,0590 g g⁻¹ dia⁻¹). Aos 33 DAA, a aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumentos de 103 e 195%, respectivamente, correspondendo as taxas de crescimento relativo de 0,0410 e 0,0780 g g⁻¹ dia⁻¹ (Figura 8B).

Figura 8 – Taxa de crescimento relativo de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



** $P \leq 0,01$.

1.3.9 Taxa de assimilação líquida

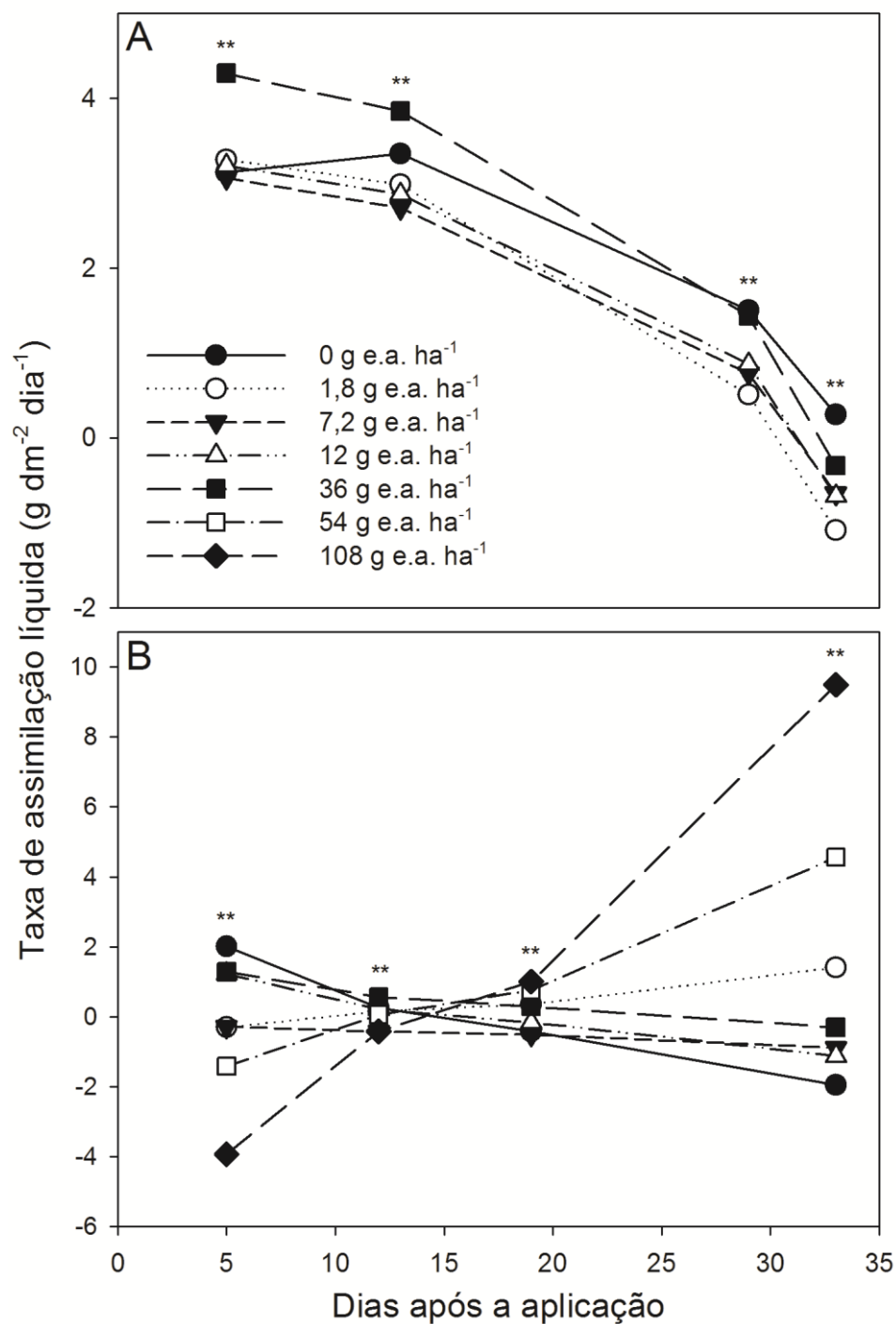
Na safra de inverno, a dose 36 g e.a. ha^{-1} aumentou a TAL até 29 DAA, com redução aos 33 DAA (Figura 9A). As plantas reduziram continuamente a TAL até 33 DAA.

Aos 5 DAA foi observado aumento após a aplicação da dose de 36 g e.a. ha⁻¹, de 45%, correspondendo ao maior valor de taxa de assimilação líquida, de 4,33 g dm⁻² dia⁻¹. Aos 33 DAA, as doses 0 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram as maiores TAL, correspondendo a 0,78 e -0,29 g dm⁻² dia⁻¹, respectivamente. As plantas tratadas com as doses 1,8; 7,2 e 12 g e.a. ha⁻¹ tiveram reduções de 65, 22 e 14%, respectivamente.

Na safra das águas, as doses 1,8; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ reduziram a TAL, com posterior aumento aos 33 DAA (Figura 9B). As plantas tratadas com as doses 0; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ apresentaram redução contínua da TAL até 33 DAA, enquanto, as doses 1,8; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ aumentaram continuamente a TAL até 33 DAA.

Aos 5 DAA, o maior valor foi observado na dose 0 e 36 g e.a. ha⁻¹, com valores de 2,01 e 1,28 g dm⁻² dia⁻¹, respectivamente. O menor valor foi observado na dose 108 g e.a. ha⁻¹ (-3,92 g dm⁻² dia⁻¹). Aos 33 DAA, a aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumentos na TAL de 133 e 387%, respectivamente, correspondendo a 4,55 e 9,49 g dm⁻² dia⁻¹, respectivamente.

Figura 9 – Taxa de assimilação líquida de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



1.3.10 Razão de área foliar

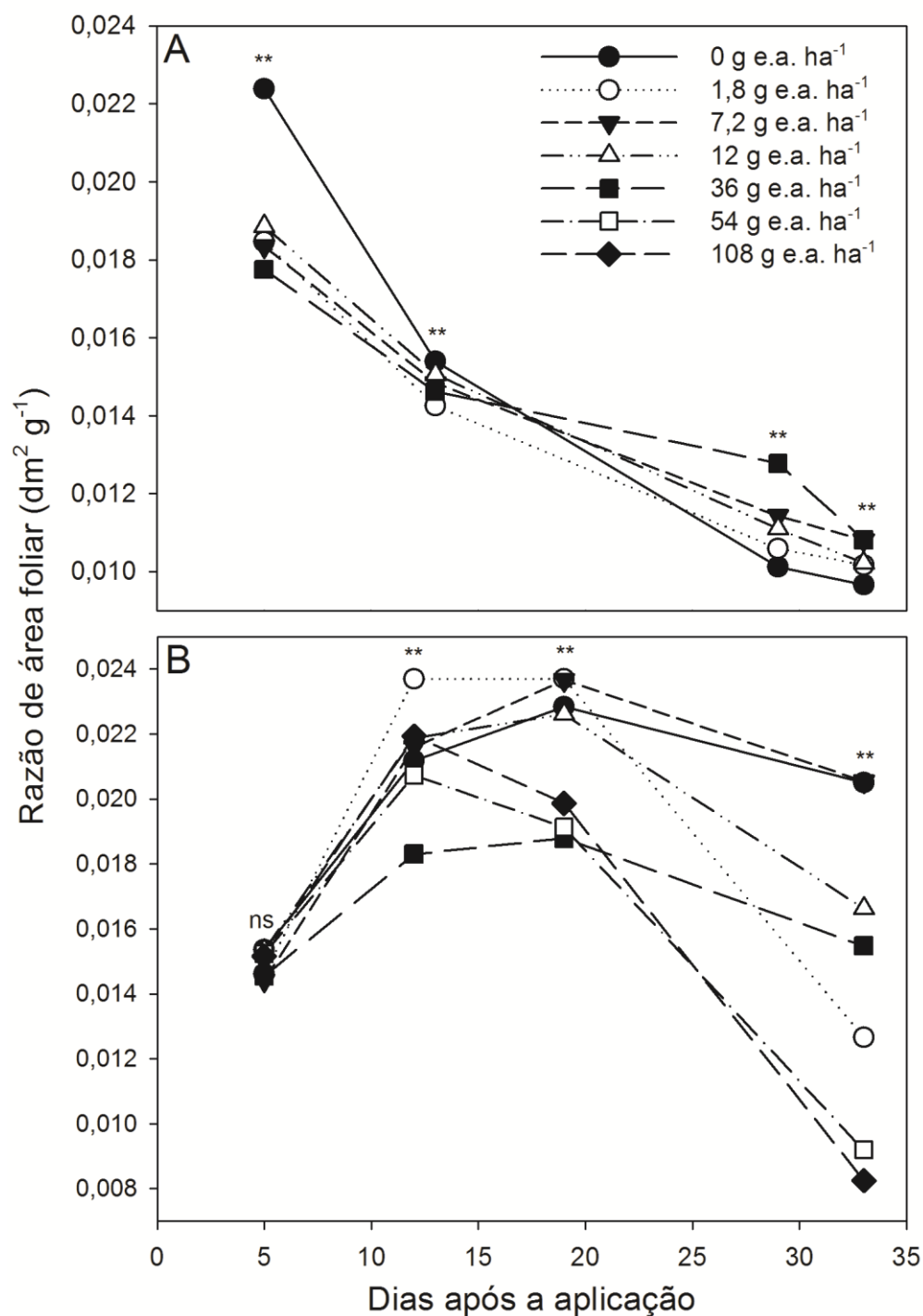
Na safra de inverno, as doses de glyphosate proporcionaram redução na RAF (Figura 10A). As plantas tratadas com as doses 7,2 e 36 g e.a. ha^{-1} retomaram a RAF aos 33 DAA. As plantas reduziram continuamente a RAF até 33 DAA.

Aos 5 DAA, o maior valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, de 0,0235 dm² g⁻¹, e a aplicação das doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou reduções de 26 e 25%, respectivamente. Aos 33 DAA, a aplicação das doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumentos de 17 e 15%, respectivamente, correspondendo a 0,0112 e 0,0110 dm² g⁻¹.

Na safra das águas, as doses de glyphosate proporcionaram redução na RAF até 33 DAA (Figura 10B). As plantas aumentaram a RAF até 12 DAA e reduziram aos 33 DAA.

Aos 33 DAA, os maiores valores foram observados nas doses 0 e 7,2 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,0204 e 0,0205 dm² g⁻¹, enquanto que, a aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou reduções de 55 e 60%, respectivamente.

Figura 10 – Razão de área foliar de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

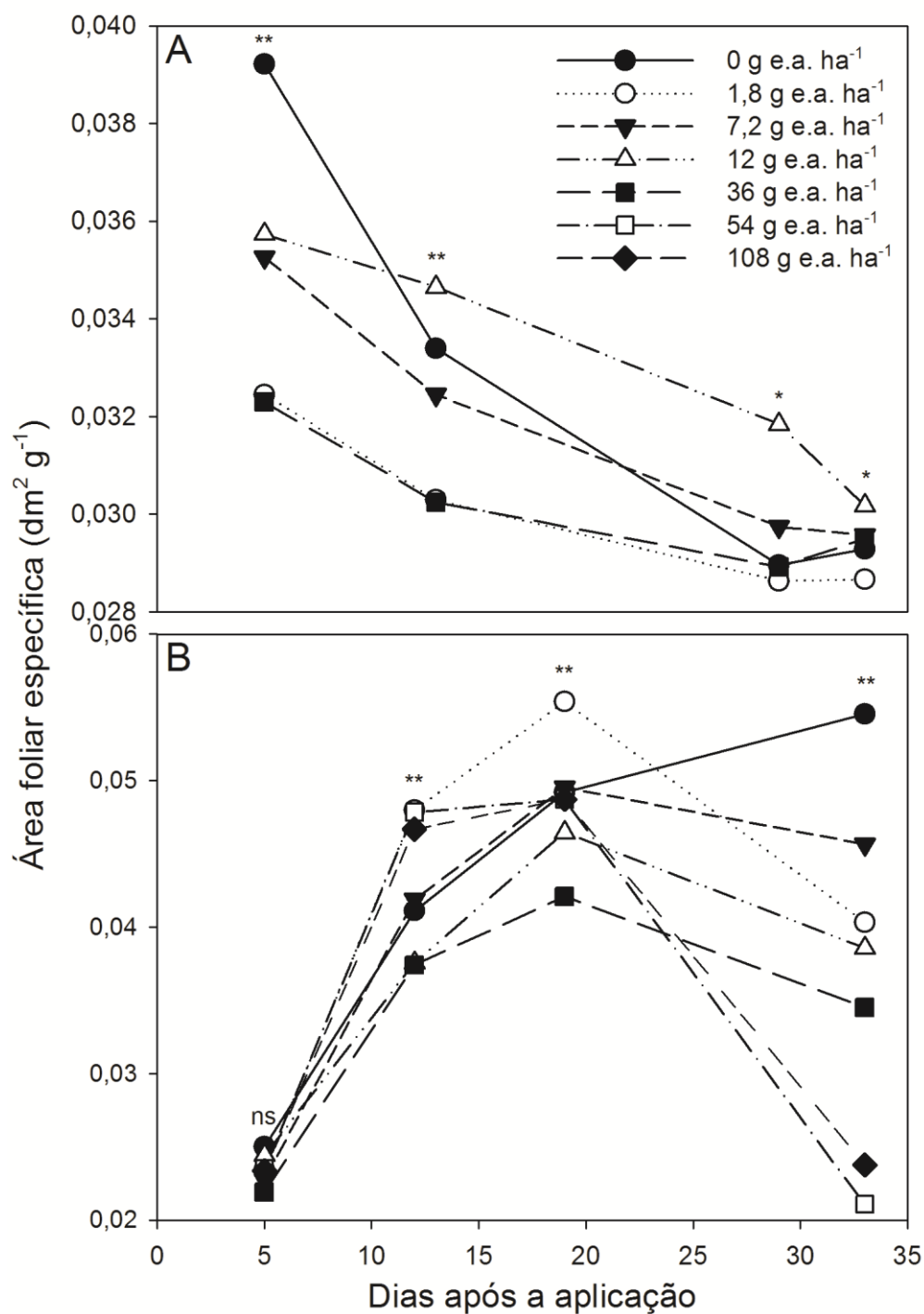
1.3.11 Área foliar específica

Na safra de inverno, as doses de glyphosate reduziram a AFE aos 5 DAA, aos 33 DAA os tratamentos não diferiram em relação à dose 0 g e.a. ha^{-1} (Figura 11A). As plantas reduziram a AFE até 33 DAA.

Aos 5 DAA, as doses 0 e 12 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram o maior valor de AFE, correspondendo a 0,0401 e 0,0382 dm² g⁻¹, enquanto a aplicação das doses 1,8; 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou reduções de 17, 19 e 19%. Enquanto que aos 33 DAA não foi observada diferença significativa entre os tratamentos (Figura 11A).

Na safra das águas, as doses de glyphosate reduziram a AFE até 33 DAA (Figura 11B). As plantas aumentaram a AFE até 19 DAA, com redução aos 33 DAA. Aos 33 DAA, o maior valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 0,0545 dm² g⁻¹. O menor valor foi observado nas plantas tratadas com as doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, com reduções de 61 e 57%, respectivamente.

Figura 11 – Área foliar específica de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$.

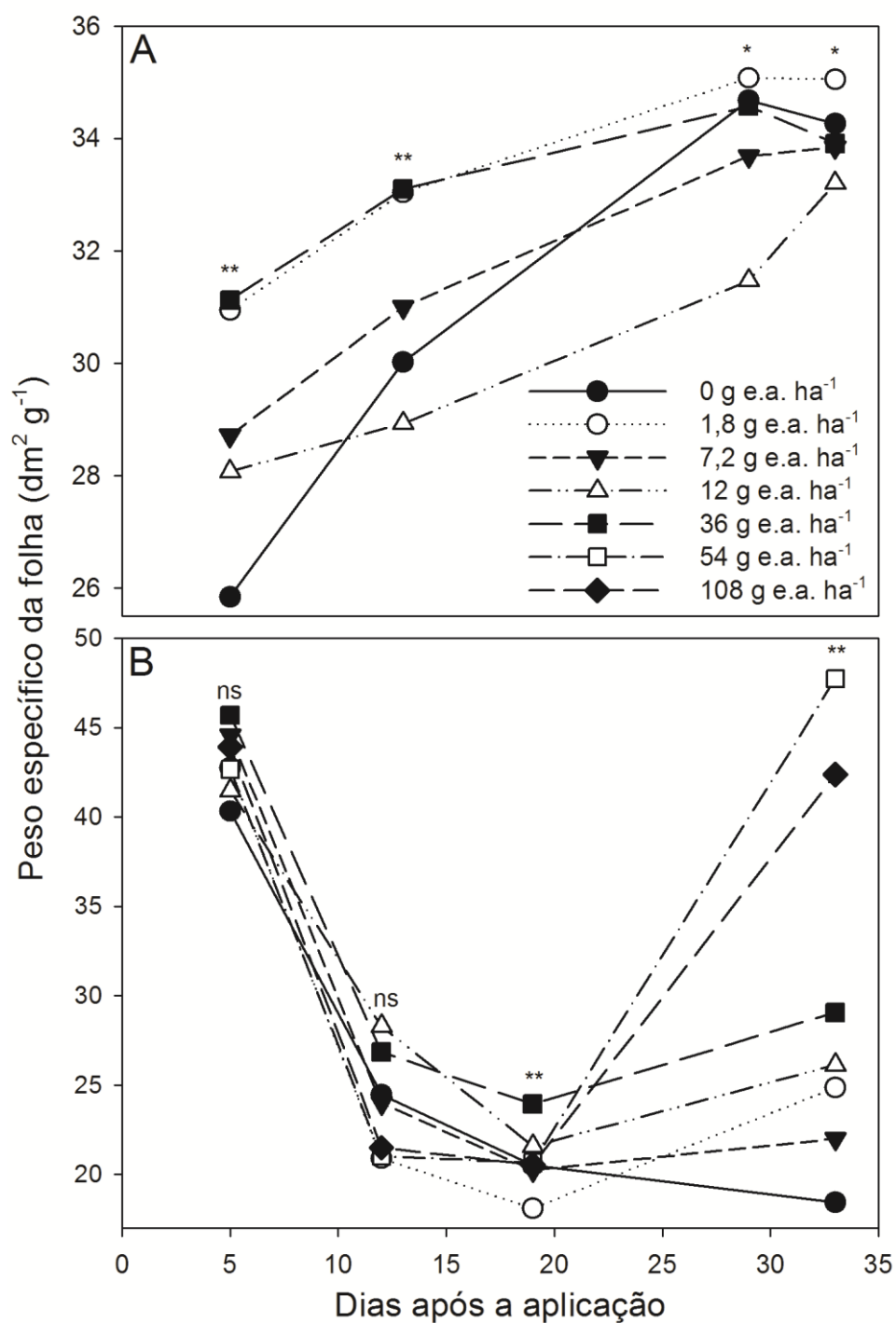
1.3.12 Peso específico da folha

Na safra de inverno, as doses de glyphosate aumentaram o PEF (Figura 12A). As plantas aumentaram continuamente o PEF até 33 DAA.

Aos 5 DAA, o maior valor foi observado nas plantas tratadas com a dose 36 g e.a. ha⁻¹, com aumento de 23%, resultando em 31,05 dm² g⁻¹, enquanto o menor valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹. Aos 33 DAA, a aplicação da dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ proporcionou o maior valor de PEF, com 36,45 dm² g⁻¹, enquanto o menor valor foi observado nas plantas tratadas com as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ (Figura 12A).

Na safra das águas, as doses de glyphosate aumentaram o PEF (Figura 12B). As plantas reduziram o PEF até 19 DAA, e aumentaram aos 33 DAA. Aos 33 DAA, a aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumentos de 159 e 130%, respectivamente, enquanto o menor valor foi observado na dose 0 g e.a. ha⁻¹, correspondendo a 18,43 dm² g⁻¹ (Figura 12B).

Figura 12 – Peso específico de feijoeiro aos 5, 13, 29 e 33 dias após a aplicação (DAA) de subdoses de glyphosate, na safra de inverno (A) e aos 5, 12, 19 e 33 DAA na safra das águas (B), em Botucatu – SP, 2016.



1.4 Discussão

As subdoses de glyphosate proporcionaram alterações na altura, área foliar, massa de matéria seca de folhas, do caule e total, bem como na taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida,

razão de área foliar, área foliar específica e peso específico da folha do feijoeiro de ciclo precoce. Houve variação de resposta em função da época do ano e da variável avaliada.

A temperatura ótima de crescimento do feijoeiro está entre 17,5 a 25,0°C, a temperatura mínima para o desenvolvimento do feijoeiro é de 10°C e a máxima de 35°C (VIEIRA et al., 2006; PEREIRA et al., 2014). Em ambas as safras a temperatura média observada esteve numa faixa mais ampla em relação à faixa considerada ótima, porém a temperatura média não ficou abaixo da mínima (10°C) em nenhuma das safras (Figura 1). No entanto, na safra das águas a temperatura média foi superior à temperatura máxima considerada ideal (35°C).

A radiação solar também é primordial no desenvolvimento do feijoeiro, e na determinação do rendimento (DIDONET, 2010). Na safra de inverno, tem-se menos radiação solar incidente, pelo fato de os dias serem mais curtos, o contrário ocorre na safra das águas, em que os dias são mais longos. As temperaturas ideais promovem o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (DIDONET, 2010), enquanto temperaturas mais baixas podem atrasar o desenvolvimento vegetativo do feijoeiro (PEREIRA et al., 2014). No presente trabalho, foi observado prolongamento do ciclo do feijoeiro na safra de inverno (102 DAS), na qual ocorreram temperaturas e comprimento do dia menores, enquanto, na safra das águas, com temperatura e dias maiores o ciclo foi menor (92 DAS). De fato, segundo Didonet (2010), é esperado que temperaturas mais altas acelerem o ciclo do feijoeiro.

As condições ambientais, como temperatura e radiação solar, provocam modificações na resposta ao efeito de hormese e na amplitude da resposta (BELTZ, CEDERGREEN, 2010). O efeito de hormese foi verificado em *Lactuca sativa* L., cinco dias após a aplicação da toxina natural partenina, apenas nas plantas que cresceram em temperaturas entre 18 a 24°C e entre 25 a 30°C, e em plantas que cresceram em temperaturas entre 10 a 15°C o efeito de hormese foi observado somente 10 dias após a aplicação, devido ao crescimento mais lento em baixas temperaturas (BELTZ, CEDERGREEN, 2010). Por outro lado, Beltz (2008) observou que em temperaturas mais baixas (12 - 20°C) o efeito de hormese teve maior amplitude e foi observado em doses mais baixas em comparação com temperaturas mais altas (17 - 29°C), em que não foi observado efeito. Cedergreen (2008) observou efeito de hormese na biomassa de cevada no inverno e nenhum efeito no verão, evidenciando a influência do ambiente na variável avaliada.

No presente estudo, o efeito das subdoses de glyphosate foi observado cinco dias após a aplicação na safra de inverno (10,6 - 26,5°C), com exceção da altura de plantas. Na safra das águas (9,5 - 35,2°C), o efeito das subdoses de glyphosate também foi observado aos 5 DAA, com exceção da altura de plantas, razão de área foliar, área foliar específica e peso específico (Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12).

A altura de plantas e área foliar do feijoeiro foi reduzida com a aplicação de 108 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate (Figura 2, 3). Não foi observado efeito estimulatório das subdoses de glyphosate na altura de plantas de feijoeiro para ambas as safras. Para a área foliar, na safra de inverno, houve incremento após a dose 36 g e.a. ha⁻¹. França et al. (2013) também observaram redução na altura de plantas e área foliar em café até 120 DAA e Magalhães et al. (2001b) verificaram reduções na altura de plantas de sorgo. Por outro lado, Magalhães et al. (2001a) não observaram efeito na altura, AF e massa de matéria seca em milho. Silva et al. (2012a) não observaram efeito da aplicação de subdoses de glyphosate na altura do feijoeiro nas cultivares Pérola, Carioca Precoce e Juriti. Enquanto Silva et al. (2009) observaram aumento na altura de plantas de cana-de-açúcar.

O aumento na altura de plantas pode favorecer a competição por luz entre espécies (CEDERGREEN, 2008). Plantas que conseguem aumentar a taxa de crescimento da cultura após aplicação de compostos estimulatórios podem ter vantagens na competição com outras espécies que não têm efeito da aplicação dos mesmos compostos ou têm efeitos negativos (CEDERGREEN, 2008).

As folhas são responsáveis pela captação de luz e produção de fotoassimilados, portanto, reduções na área foliar causam, consequentemente, redução na assimilação de fotoassimilados e reduzem a quantidade a ser exportada para os grãos (MAGALHÃES et al., 2001a), assim o aumento na AF poderá acarretar grãos mais pesados ou maior número de grãos, e aumentar a produtividade, no entanto, aumento excessivo na área foliar poderá acarretar em auto sombreamento, reduzindo a produtividade.

Alterações na morfologia das plantas após a aplicação de subdoses de glyphosate podem ocorrer devido ao aumento na ativação da auxina. O glyphosate interfere na síntese de auxina, bloqueando os seus precursores, e para compensar a baixa síntese de auxina, o vegetal pode aumentar a atividade da auxina, o que leva a aumento de biomassa e alterações morfológicas (CEDERGREEN, 2008), porém

não se sabe ainda como isto ocorre. A aplicação de baixas doses de auxina causa efeito de hormese nas culturas, portanto se um composto estimular a produção ou a atividade da auxina pode-se esperar efeito de hormese (CEDERGREEN et al., 2007).

Em trapoeraba (*Commelina benghalensis*) foram observados aumentos da altura e AF por mais de 20 dias após a aplicação de 2 a 24 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate (MESCHÉDE et al., 2008). Os autores atribuíram esta resposta ao aumento na concentração de ácido chiquímico nas plantas tratadas.

A aplicação de subdoses de 2,4-D causou redução na massa de matéria seca de folhas e total com aumento das doses em pequi (*Caryocar brasiliense*), por outro lado, a área foliar aumentou 21% em doses baixas (3,3 g ha⁻¹) e reduziu a partir da dose 33,5 g ha⁻¹ (TAVARES et al., 2017).

No presente trabalho, na safra de inverno, houve efeito estimulatório na massa de matéria seca de folhas, caule e parte aérea na dose 36 g e.a. ha⁻¹. Na safra das águas, houve redução nas doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, com posterior retomada na produção de biomassa, que pode ser resultado de brotamento e a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ aumentou a massa de matéria seca de caule e parte aérea (Figuras 4, 5, 6).

Em feijoeiro, Rabello et al. (2012) observaram aumento na massa de matéria seca de folhas e de parte aérea na dose 12,9 g ha⁻¹ de glyphosate, enquanto Silva et al. (2016) obtiveram redução na massa de matéria seca na dose 15 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate. Em soja, Velini et al. (2008) observaram maior produção de biomassa em doses entre 1,8 a 18 g e.a. ha⁻¹, enquanto doses acima de 72 inibiram o crescimento. Também foram observados efeitos da aplicação de subdoses de glyphosate na massa de matéria seca de milho, *Commelina benghalensis* e *Pinus caribea* (VELINI et al., 2008), cana-de-açúcar (CARBONARI et al., 2014; NASCENTES et al., 2017), eucalipto (NASCENTES et al., 2017; VELINI et al., 2008), *Brachiaria brizantha*, cultivar Marandu (NASCENTES et al., 2015) e café (CARVALHO et al., 2013).

A redução nos parâmetros de crescimentos das plantas nas doses mais altas de glyphosate ocorre devido à inibição da enzima EPSPs, que acarreta na redução da síntese de aminoácidos aromáticos, compostos especializados e proteínas (CARVALHO et al., 2013). Essas alterações metabólicas causam redução no crescimento de plantas e podem levar à morte. O mecanismo que promove o estímulo em baixas doses ainda não é conhecido, porém pode estar relacionado à

inibição parcial da enzima EPSPs (CARVALHO et al., 2013; VELINI et al., 2008). O fato de que a aplicação de subdoses de glyphosate não promove efeito de hormese em culturas resistentes indica que o efeito de hormese pode estar ligado à inibição parcial da EPSPs e a rota do ácido chiquimico (CARVALHO et al., 2013, VELINI et al., 2008).

Outra possível explicação seria que a redução na síntese de lignina proporciona maior elasticidade à parede celular e, conseqüentemente, esta pode se expandir, acarretando maior crescimento da planta (DUKE et al., 2006). Para que ocorra aumento de biomassa, as culturas devem aumentar a taxa de assimilação de CO₂ ou reduzir a taxa de respiração (CEDERGREEN, OLESEN, 2010). No entanto, é improvável que ocorra redução na respiração, pois a aplicação de compostos exógenos às plantas leva a um processo de detoxificação, o que aumenta o gasto energético (COLE, 1994), portanto, é possível que ocorra aumento na taxa de assimilação de CO₂, seja por maior eficiência na captação de luz ou maior eficiência na fixação de CO₂ (CEDERGREEN, OLESEN, 2010).

Em cevada foi observado aumento na altura de plantas, número de folhas e AF após aplicação de 20 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, além do crescimento mais rápido em relação às plantas não tratadas (CEDERGREEN, OLESEN, 2010). Os autores não observaram alteração na taxa de assimilação, porém foi observada maior respiração das plantas um dia após a aplicação, confirmando o aumento da atividade metabólica nas plantas tratadas com subdoses de herbicidas para detoxificação, inativação de compostos ou compartimentalização (CEDERGREEN, OLESEN, 2010; COLE, 1994). Portanto, o aumento no crescimento deve ser resultado de aumento na taxa de assimilação de CO₂ ou ao redirecionamento do carbono. Cedergreen e Olesen (2010) observaram aumento na taxa de assimilação de CO₂ em plantas de cevada tratadas com 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Na safra de inverno, as subdoses de glyphosate proporcionaram maior TCC, maior velocidade de crescimento, a TCR e TAL aumentaram na dose 36 g e.a. ha⁻¹, porém estes aumentos não foram observados com o passar do tempo (33 DAA), na safra das águas, as doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ reduziram a TCC, TCR e TAL, retomando com o passar do tempo (Figura 7, 8 e 9).

A TCC indica a velocidade média de acúmulo de massa de matéria seca da cultura no período avaliado (BENINCASA, 2003). A TCR está relacionada à competição entre as plantas pelos fatores ambientais, como água, luz e nutrientes

(SILVA et al., 2012b). O aumento na TCR pode indicar maior capacidade de adaptação às mudanças no ambiente. A TCC, TCR e TAL tendem a decrescer com o desenvolvimento do ciclo fenológico da cultura (JEUER et al., 2003), isto ocorre devido ao auto-sombreamento e produção de órgãos não fotossintetizantes, como vagens e grãos (SILVA et al., 2012b).

O aumento na TCR observado no presente estudo pode ser explicado pelo aumento na TAL, pois a TCR é produto da TAL pela RAF, como a RAF foi constante ou com pequenas reduções, as variações na TCR após aplicação das subdoses de glyphosate foram função da TAL.

Nascentes et al. (2015) relacionaram o aumento de 32% na TCC em *Brachiaria brizantha*, cultivar Marandu, após 15 dias da aplicação de 10,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, e aumento de 17% aos 30 DAA, com o aumento na altura e massa de matéria seca de plantas. Em cevada, maior velocidade de crescimento foi observada uma semana após a aplicação de doses menores que 63 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, e após três semanas da aplicação a TCC foi menor ou igual ao tratamento controle (CEDERGREEN, 2008). Este aumento inicial na velocidade de crescimento pode proporcionar maior competitividade das plantas, levando ao melhor estabelecimento da cultura.

A TAL reflete a eficiência do sistema assimilador da cultura, envolvida na produção de matéria seca, e é resultado da interação dos fatores ambientais, como luz, água, temperatura, CO₂, nutrientes, entre outros (PINZÓN-TORRES, SCHIAVINATO, 2008). O aumento observado na AF e massa de matéria seca podem ocorrer por um aumento na TAL. Por outro lado, o incremento na AF e massa de matéria seca pode ser explicado por aumento no número de folhas. De fato, isto foi observado por Jeuer et al. (2003) avaliando a cultivar de feijoeiro Pérola em diferentes densidades de semeadura.

Na safra de inverno, as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ aumentaram a RAF, a AFE e PEF não diferiram entre os tratamentos, na safra das águas, as subdoses de glyphosate proporcionaram redução na RAF e AFE e aumento no PEF (Figuras 10, 11, 12). A RAF, expressa a área foliar útil para a fotossíntese, é utilizada para avaliar os efeitos fenotípicos e ambientais nas culturas (SILVA et al., 2012b). A AF útil diminui com o passar do tempo, resultando em queda na RAF, o que pode ocorrer devido ao redirecionamento dos fotoassimilados para a formação de vagens e grãos (SILVA et al., 2012b). A AFE relaciona-se inversamente com a densidade das folhas,

assim, no início do desenvolvimento os valores podem ser maiores, indicando folhas pouco espessas, com pouca massa seca e AF, mas com o desenvolvimento da cultura, e aumento na massa seca e AF, os valores de AFE diminuem (BENINCASA, 2003). A AFE é uma medida estratégica da alocação de biomassa e seus componentes são sensíveis às mudanças ambientais (PINZÓN-TORRES, SCHIAVINATO, 2008).

O PEF reflete a espessura da folha (BENINCASA, 2003), sendo o inverso da AFE. A AFE é a razão da área foliar pela massa foliar, portanto, reduções nos valores de AFE estão relacionadas ao aumento na massa de matéria seca de folhas ou redução na área foliar.

Subdoses de glyphosate são suficientes para reduzir a atividade da enzima EPSPs, alterando o transporte de carbono, que pode ser redirecionado ao crescimento (NASCENTES et al., 2015) ou para os órgãos reprodutivos (CEDERGREEN et al., 2009). Silva et al. (2016) observaram redução na massa de matéria seca de feijoeiro após aplicação de subdoses de glyphosate. O mesmo foi observado por Cedergreen et al. (2009) na cultura da cevada. Enquanto, Silva et al. (2012a) não observaram efeito na parte aérea em feijoeiro, cultivares Juriti e Pérola. Por outro lado, Cedergreen (2008) observaram aumento na massa de matéria seca de cevada.

À medida que avançam os estádios fenológicos da cultura, o metabolismo do vegetal estabelece prioridades, direcionando os fotoassimilados para os locais de maiores demandas, portanto, a aplicação de subdoses de glyphosate próximo ao máximo desenvolvimento vegetativo e início da diferenciação floral proporcionou melhores resultados (SILVA et al., 2016). A aplicação de substância estimulatórias quando a cultura está pouco desenvolvida pode não sustentar os efeitos até a colheita, como o observado por Cedergreen (2008), por outro lado, a aplicação de subdoses de glyphosate próximo à fase de enchimento de grãos proporcionou aumento na produtividade de cevada (CEDERGREEN et al., 2009).

Na safra de inverno, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou incrementos na AF, massa de matéria seca de folhas, caule e parte aérea, TCC e RAF até o final das avaliações (33 DAA), indicando efeitos benéficos no crescimento do feijoeiro. Na safra das águas, ao final das avaliações (33 DAA), na dose 36 g e.a. ha⁻¹ foram observados incrementos na massa de matéria seca de caule e parte aérea, TCR, TAL e PEF. Por outro lado, a dose 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 36% na

altura e de 27% na AF, que apesar da retomada na produção de biomassa, não compensou essas reduções.

1.5 Conclusão

Houve estímulo do crescimento em feijoeiro de ciclo precoce com a aplicação de subdoses de glyphosate.

Em ambas as safras, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate promoveu o crescimento do feijoeiro.

REFERÊNCIAS

ABBAS, T. et al. Glyphosate hormesis increases growth and yield of chick pea (*Cicer arietinum* L.). **Pakistan Journal of Weed Science Research**, v. 21, n. 1, p. 533-542, 2015.

AMBROSANO, E.J. et al. **Feijão**. In: RAIJ, B. van, CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 194-195. (Boletim Técnico, 100).

BELZ, R.G. Stimulation versus inhibition – bioactivity of parthenin, a phytochemical from *Parthenium hysterophorus* L. **Dose–Response**, v. 6, n. 1, p. 80-96, 2008.

BELTZ, R.G.; CEDERGREEN, N. Parthenin hormesis in plants depends on growth conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 1, p. 293-301, 2010.

BELZ, R.; CEDERGREEN, N.; DUKE, S.O. Herbicide hormesis - can it be useful in crop production? **Weed Research**, v. 5, n. 4, 321-332, 2011.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 2 ed. 2003, 42p.

CALABRESE, E.J.; BALDWIN, L.A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 1, p. 91-97, 2002.

CARBONARI, C.A. et al. Glyphosate effects on sugarcane metabolism and growth. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 1, p. 3585-3593, 2014.

CARVALHO, L.B.; ALVES, P.L.C.A.; DUKE, S.O. Hormesis with glyphosate depends on coffee growth stage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, n. 1, p. 813-822, 2013.

CEDERGREEN, N. et al. The occurrence of hormesis in plants and algae. **Dose–Response**, v. 5, n. 1, p. 150-162, 2007.

CEDERGREEN N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time? **Environmental Pollution**, v. 156, n. 1, p. 1099–1104, 2008.

CEDERGREEN, N. et al. Chemical stress can increase crop yield. **Field Crops Research**, v. 114, n. 1, p. 54-57, 2009.

CEDERGREEN, N.; OLESEN, C.F. Can glyphosate stimulate photosynthesis? **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 96, n. 3, p. 140-148, 2010.

COLE, D.J. Detoxification and activation of agrochemicals in plants. **Journal of Pest Science**, v. 42, n. 1, p. 209-222, 1994.

CONAB. **A cultura do feijão**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes>> Acesso em: 02/08/2018.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: décimo segundo levantamento – setembro 2018. Brasília: Conab, v. 5, n. 12 148p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 11/01/2019.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: quarto levantamento – janeiro 2019. Brasília: Conab, v. 6, n. 4, 126p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 11/01/2019.

DIDONET, D.A. Importância do período pré-floração na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 505-512, 2010.

DUKE, S.O. et al. Hormesis: Is it an important factor in herbicide use and allelopathy? **Outlooks on Pest Management**, v. 17, n. 1, p. 29-33, 2006.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.^a ed. Rio de Janeiro, 2013, 353p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Production 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 10/01/2019.

FRANÇA, A.C. et al. Deriva simulada do glyphosate em cultivares de café Acaiá e Catucaí. **Planta Daninha**, v. 31, n. 2, p. 443-451, 2013.

IAC. **Cultivares de feijoeiro IAC**. São Paulo: Instituto Agrônomo, 2018. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/feijao.php>> Acesso em: 25/04/2018.

MAGALHÃES, P.C. et al. Efeito de doses reduzidas de glyphosate e paraquat simulando deriva na cultura do milho. **Planta Daninha**, v. 19, n. 2, p. 247-253, 2001a.

- MAGALHÃES, P.C. et al. Efeito de doses reduzidas de glyphosate e paraquat simulando deriva na cultura do sorgo. **Planta Daninha**, v. 19, n. 2, p. 255-262, 2001b.
- MESCHEDE, D.K.; VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A. Baixas doses de glyphosate e seus efeitos no crescimento de *Commelina benghalensis*. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 7, n. 2, p. 53-58, 2008.
- NASCENTES R.F. et al. Glyphosate hormesis in *Brachiaria brizanta* cv. Marandu. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, v. 6, n. 1, p. 55–64, 2015.
- NASCENTES, R.F. et al. Low doses of glyphosate enhance growth, CO₂ assimilation, stomatal conductance and transpiration in sugarcane and eucalyptus. **Pest Management Science**, v. 74, n. 1, p. 1197-1205, 2017.
- PEREIRA, V.G.C. et al. Exigências agroclimáticas para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 32-42, 2014.
- PINZÓN-TORRES, J.A.; SCHIAVINATO, M.A. Crescimento, eficiência fotossintética e eficiência do uso da água em quatro espécies de leguminosas arbóreas tropicais. **Hoehnea**, v.35, n.3, p.395-404, 2008.
- RABELLO, W.S. et al. Growth and phosphorus absorption by commun bean 'Xodó' genotype under effect of glyphosate reduced rates. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 2, p. 204-212, 2012.
- SILVA, J.C. et al. Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 295-302, 2012a.
- SILVA, J.C. et al. Influência de doses reduzidas e épocas de aplicação sobre o efeito hormético de glyphosate em feijoeiro. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 115, n. 2, p. 191-199, 2016.
- SILVA, M.A. et al. Efeito hormético de glyphosate no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009.
- SILVA, R.R. et al. Análise de crescimento em feijoeiro cultivado sob diferentes densidades de semeadura. **Scientia Agraria**, v. 13, n. 2, p. 41-51, 2012b.
- TAVARES, C.J. et al. Crescimento inicial de plantas de pequi após aplicação de 2,4-D. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 81-87, 2017.
- VALE, N.M. et al. Escolha de genitores quanto à precocidade e produtividade de feijão tipo carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 141-148, 2015.
- VELINI, E.D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

VELINI, E.D. et al. Growth regulation and other secondary effects of herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 1, p. 351-354, 2010.

VIEIRA, C.; JÚNIOR, T.J.P.; BORÉM, A. **Feijão**. 2 ed. Viçosa: UFV -Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600p.

CAPÍTULO 2

CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NAS FOLHAS E NOS GRÃOS DO FEIJOEIRO É AFETADA POR SUBDOSES DE GLYPHOSATE E ÉPOCAS DE CULTIVO

Fernanda Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro¹, Marcela Cristina Brunelli-Nascentes¹, Marcelo de Almeida Silva¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas. Av. Universitária, 3780, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: ferborto@yahoo.com.br

RESUMO

Existem relatos de alterações no teor de nutrientes das culturas após aplicação de glyphosate, mesmo em doses baixas. Dessa forma, o objetivo foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações no teor de macro e micronutrientes no feijoeiro comum de ciclo precoce e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura. Foram conduzidos dois experimentos em campo e a cultivar utilizada foi a IAC Imperador, feijoeiro de ciclo precoce. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, constituído de doses de glyphosate aplicadas no estágio fenológico V₄, com quatro repetições. O primeiro experimento foi instalado na safra de inverno e o segundo na safra das águas. Na safra de inverno, os tratamentos consistiram de cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹), e na safra das águas os tratamentos consistiram de sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹). Foram avaliados os teores de macro e micronutrientes nas folhas e grãos. As subdoses de glyphosate, com influência da época de cultivo, alteraram os teores de nutrientes das folhas e grãos do feijoeiro de ciclo precoce. Na safra de inverno, as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ elevaram o teor de nutrientes nas folhas do feijoeiro, enquanto nos grãos houve apenas aumento no teor de Cu com a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹. Na safra das águas não houve aumento nos teores de nutrientes nas folhas de feijoeiro. Já para os grãos houve aumento nos teores de Cu, Zn, Mn e Fe a partir da dose 12 g e.a. ha⁻¹.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., hormese, macronutrientes, micronutrientes, herbicida.

ABSTRACT

There are reports of changes in nutrient content of crops after application of glyphosate, even at low doses. Thus, the objective was to evaluate if the application of glyphosate low doses promotes changes in macro and micronutrient content in common bean and whether these effects are influenced by the planting seasons. Two experiments were conducted in the field and the cultivar used was the IAC Imperador, common bean of early cycle. The experimental design was a randomized block design, consisting of doses of glyphosate and one season of application (phenological stage V4), with four replications. The first experiment was carried out in the winter season and the second in the water season. In the winter season, treatments consisted of five glyphosate sub-doses (0, 1.8, 7.2, 12 and 36 g of acid equivalent (a.e.) ha^{-1}), in the water season, treatments consisted of seven subdoses of glyphosate (0.8, 7.2, 12, 36, 54 and 108 g of a.e. ha^{-1}). Macro and micronutrient content were evaluated on common bean leaves and grains. Glyphosate low doses, influenced by the growing season, resulted in changes in the evaluated parameters in common bean. In the winter season, the doses 7.2 and 36 g a.e. ha^{-1} increased the nutrient content on bean leaves, while in the grains only Cu content increased with the dose 1.8 g a.e. ha^{-1} . In the water season, there was no increased in nutrient content on bean leaves. While, in the grains there were increased in Cu, Zn, Mn and Fe content from dose 12 g a.e. ha^{-1} .

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., hormesis, macronutrient, micronutrient, herbicide.

2.1 Introdução

O feijão é um excelente alimento, representa a principal fonte de proteína para as populações de baixa renda, além de fornecer nutrientes essenciais, como ferro, manganês, cálcio, magnésio, zinco, vitaminas, carboidratos e fibras, também se destaca como um produto de importância econômica para o Brasil. O cultivo do feijoeiro se estende por praticamente todo o território nacional. O consumo é estimado em 14 kg $\text{hab}^{-1} \text{ano}^{-1}$ no país (CONAB, 2018).

No estado de São Paulo, a semeadura do feijoeiro ocorre em três épocas, a primeira entre agosto e setembro, também pode ser chamada de safra das águas; a segunda é conhecida como safra da seca, é semeada entre janeiro e fevereiro, e a terceira época entre abril e junho, também conhecida como safra de inverno.

A produção mundial de feijão em 2017 foi de 31,4 milhões de toneladas, com produtividade média de 862 kg ha⁻¹ e área colhida de 36,4 milhões de hectares (FAO, 2017). A principal região produtora foi a Ásia (49,0%), seguida das Américas (25,2%), África (21,7%) e Europa (3,5%) (FAO, 2017). A produção total de feijão no Brasil na safra de 2017/18 foi de 3,1 milhões de toneladas, com área semeada de 3,2 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média total de 981 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Para a safra 2018/19, a estimativa é de 3,1 milhões de hectares de área plantada, com 1.002 kg ha⁻¹ de produtividade e produção total de 3,1 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

Em plantas susceptíveis, os herbicidas atuam alterando os processos fisiológicos, bioquímicos e até a nutrição das culturas (DUKE et al., 2012a; GOMES et al., 2014). O efeito do herbicida glyphosate na nutrição de culturas tanto sensíveis quanto tolerantes ao herbicida é contraditório (DUKE et al., 2012a, GOMES et al., 2014). Alguns estudos mostraram alterações na nutrição mineral (CAKMAK et al., 2009, FRANÇA et al., 2010, SENEN SU et al., 2009), enquanto outros não observaram nenhum efeito (DUKE et al., 2012b; RABELLO et al., 2014, SANTOS et al., 2007).

Atualmente, o glyphosate é o herbicida mais usado no mundo todo, atua na enzima 5-enolpiruvil chiquimato 3-fosfato sintase (EPSPs), bloqueando a síntese de aminoácidos aromáticos, tirosina, triptofano e fenilalanina e compostos especializados.

O glyphosate é considerado um quelante para cátions divalentes e trivalentes, como Ca, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe, e se liga a esses nutrientes por grupos amino, carboxílicos e fosfatos, formando complexos estáveis e insolúveis (BARJA et al., 2001, BELLALLOUI et al., 2009; CAKMAK et al., 2009, GOMES et al., 2014; MERTEN et al., 2018). Nas plantas, o glyphosate é transportado pelo floema, onde pode interagir com os nutrientes presentes impactando o balanço nutricional da planta (HARRIS et al., 2012), também pode imobilizar os nutrientes no tecido foliar (CAKMAK et al., 2009), ou interferir na absorção e translocação (EKER et al., 2006; OZTURK et al. 2008).

O glyphosate também pode interferir na absorção de nutrientes pelas raízes através de alterações no seu estado fisiológico (DUKE et al., 2012a). Na solução de aplicação também ocorre a formação de complexos de glyphosate com Ca, Mg, Cu, Zn, Mn e Fe, reduzindo o efeito do herbicida (BERNARDS et al., 2005; MUELLER et al., 2006).

Existem relatos de alterações no teor de nutrientes das culturas após aplicação de glyphosate, mesmo em doses baixas (BOTT et al., 2008). Em soja convencional e transgênica foram relatadas alterações no teor de nutrientes após aplicação de glyphosate. Zobiole et al. (2010) observaram redução nos teores de P, Ca, Mn, Fe, Zn e Cu em folhas e grãos de soja transgênica, enquanto Duke et al. (2012b) não observaram alterações nos teores de macro e micronutrientes em soja transgênica. Na soja convencional foram observados redução no teor de Fe (BELLALLOUI et al., 2009), redução no teor de Mn (BOTT et al., 2008), aumento no teor de P e redução no teor de Ca, Mg, Mn e Fe (CAKMAK et al., 2009).

Bellaloui et al. (2006) observaram reduções no teor de N em soja e Reddy et al. (2010) em milho, por outro lado, Ferreira et al. (2008) observaram aumento no teor de N em azevém (*Lolium multiflorum*). Em cultivares de café, França et al. (2010) verificaram redução no teor de N, P, K, Fe e Zn e aumento no teor de Ca.

No feijoeiro cultivar BR1 Xódo, Rabello et al. (2014) não observaram alterações significativas nos teores de N, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn e Mn, enquanto que o teor de P aumentou. Por outro lado, Rabello et al. (2015) verificaram reduções nos teores de N, P, S, Ca e Mg em feijoeiro cultivar Pérola. Em girassol foram observadas reduções na absorção e translocação de Fe, Mn e Zn radiomarcados (EKER et al., 2006).

É comum a ocorrência de deficiência nutricional nas populações, sendo assim, é crescente a busca por alimentos que possam suprir as carências nutricionais, portanto, aumentar o teor e a disponibilidade de nutrientes nos alimentos é um desafio para os programas de melhoramento (RIBEIRO, 2010). O aumento no teor de nutrientes nos grãos é benéfico tanto para a nutrição humana quanto para a produção agrícola, pois sementes de feijoeiro com teor de nutrientes maiores são mais resistentes às doenças e possuem maior vigor (FROSSARD et al., 2000).

Diante do exposto e da importância do feijoeiro na alimentação da população, a hipótese foi de que a aplicação de subdoses de glyphosate causa alterações no teor de macro e micronutrientes no feijoeiro em folhas e grãos em duas épocas de

semeadura. Deste modo, o objetivo foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações no teor de macro e micronutrientes no feijoeiro de ciclo precoce.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

Foram conduzidos dois experimentos em campo, na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas FCA/UNESP, localizada no município de Botucatu (22°51'01" latitude Sul e 48°25'55" longitude Oeste e altitude 800,1 m), Estado de São Paulo, Brasil. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico), com chuvas de verão e seca no inverno, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2013).

Na safra de inverno o pH do solo estava 4,7, matéria orgânica 21 g dm⁻³, 57 g dm⁻³ de P, com 5; 84; 2,6; 40 e 11 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 53 mmol dm⁻³, CTC de 137 mmol dm⁻³ e V% 39, 0,55; 6,5; 60; 20,2 e 1,6 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente. Na safra das águas, o pH estava 4,7, 28 g dm⁻³ de M.O, 57 g dm⁻³ de P, com 4; 76; 2,7; 33 e 10 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 46 mmol dm⁻³, CTC de 122 mmol dm⁻³ e V% 37, 0,56; 8,6; 33; 60,5 e 4,7 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente.

Os dados climáticos de temperatura e precipitação durante o período experimental foram coletados da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, campus de Botucatu – SP.

2.2.2 Material vegetal

A cultivar utilizada foi a IAC Imperador. Essa cultivar é caracterizada por hábito de crescimento determinado, porte de planta semi-ereto, ciclo precoce, em torno de 60-75 dias, possui flores brancas. Os grãos são classificados no grupo comercial Carioca, é de cor bege clara com listras marrons claras, com cerca de 21% de proteína, possui massa de mil grãos de 270 gramas e potencial produtivo de 4.600 kg ha⁻¹. É recomendado para a semeadura no estado de São Paulo, Brasil, para as três épocas de cultivo (águas, seca e inverno) (IAC, 2018).

2.2.3 Tratamento e delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, constituído de doses de glyphosate e uma época de aplicação, com quatro repetições. O herbicida glyphosate foi aplicado no estágio fenológico V₄ da cultura, correspondente ao maior período de crescimento vegetativo. Cada parcela experimental possuía 10 metros de comprimento, com cinco linhas, espaçamento entre linhas de 0,45 m, utilizando-se de 10 a 12 sementes por metro.

Foram realizados dois experimentos, o primeiro na safra de inverno e o segundo na safra das águas. Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹), enquanto na safra das águas os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹).

2.2.4 Condução do experimento e aplicação dos tratamentos

A semeadura do feijoeiro na safra de inverno ocorreu no dia 31 de março de 2016 e na safra das águas no dia 30 de agosto de 2016. A adubação de semeadura foi baseada na análise de solo e no Boletim 100 (AMBROSANO et al., 1996), foram utilizados 150 kg ha⁻¹ de 8-28-16 (NPK) em ambos os experimentos.

Quando houve ausência de chuvas, irrigação suplementar por aspersão foi utilizada para o suprimento adequado de água à cultura. Durante a condução dos experimentos o controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado segundo as recomendações técnicas para a cultura na região.

A adubação nitrogenada de cobertura, com aplicação de 40 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, foi realizada em ambos os experimentos, 20 dias após a semeadura (DAS).

A aplicação dos tratamentos ocorreu em 04 de maio de 2016 na safra de inverno (34 DAS), as condições climáticas foram temperatura média de 19,17°C, com temperatura máxima de 25,21°C, temperatura mínima de 14,98°C, umidade relativa de 69,81, com ausência de ventos. E em 08 de outubro de 2016 na safra das águas (39 DAS) as condições climáticas foram temperatura média de 20,08°C, com temperatura máxima de 28,43°C, temperatura mínima de 12,85°C, umidade relativa de 61,68, com ausência de ventos. Em ambos os experimentos houve precipitação no quarto dia após a aplicação dos tratamentos.

A colheita ocorreu em 11 de julho de 2016 na safra de inverno (102 DAS) e em 01 de dezembro de 2016 na safra das águas (92 DAS).

A aplicação do glyphosate foi realizada por meio de um pulverizador costal pressurizado (CO₂), com barra de pulverização com cinco pontas de latão tipo Magnum defletor 0,50, volume de calda de 200 L ha⁻¹ e pressão de aplicação de 2 bar. Foi utilizado o herbicida Roundup® original, com composição de equivalente ácido de N-(fosfonometil) glicina (360 g L⁻¹), sal de isopropilamina (480 g L⁻¹) e ingredientes inertes (684 g L⁻¹).

2.2.5 Variáveis avaliadas

2.2.5.1 Teor de nutrientes nas plantas

Foram coletadas 10 plantas por parcela, aos 13 dias após a aplicação dos tratamentos na safra de inverno e aos 12 dias após a aplicação na safra das águas. Foi coletada a primeira folha amadurecida a partir da ponta do ramo, as folhas foram secas em estufa de circulação forçada de ar, pesadas, posteriormente moídas e submetidas à análise dos teores totais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe), seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

2.2.5.2 Teor de nutrientes nos grãos

Foram coletadas 10 plantas por parcela, aos 68 dias após a aplicação dos tratamentos na safra de inverno e aos 53 dias após a aplicação na safra das águas, os grãos foram separados, secos em estufa de circulação forçada de ar, pesados, moídos e submetidos à análise dos teores totais de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe), seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

2.2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância sendo suas médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

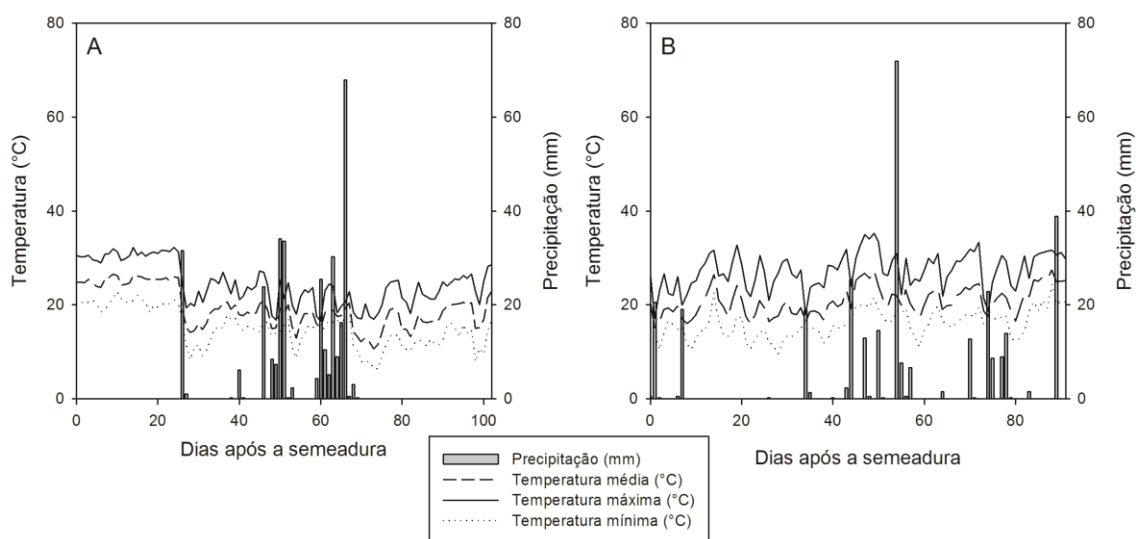
Os dados foram submetidos à análise de regressão para obtenção da dose ótima, somente serão apresentadas e consideradas para discussão as regressões significativas e com $r^2 \geq 0,7$.

2.3 Resultados

2.3.1 Condições climáticas durante o experimento

Durante a safra de inverno a temperatura média do ar variou de 10,6 a 26,5°C desde a semeadura até a colheita, com temperatura média de 19,2°C, a precipitação total foi de 321,0 mm (Figura 1A). Durante a safra das águas, a temperatura média do ar variou de 9,5 a 35,2°C, com temperatura média de 20,8°C enquanto que a precipitação total foi de 313,4 mm (Figura 1B). A safra de inverno ocorre no período de outono-inverno, o qual é caracterizado por menor comprimento do dia e assim, menos incidência de radiação solar. Enquanto que, a safra das águas ocorre no período de inverno-primavera, sendo caracterizada pelo aumento no comprimento dos dias, e assim, aumento da incidência de radiação solar.

Figura 1 – Temperatura do ar mínima, média e máxima e precipitação durante o período experimental de março a julho de 2016, safra de inverno (A) e agosto a dezembro de 2016, safra das águas (B). Botucatu – SP, 2016.



2.3.2 Teor de macronutrientes nas folhas

Na safra de inverno foi verificado efeito significativo nos teores de P ($p < 0,05$), Ca ($p < 0,05$), Mg ($p < 0,05$) e S ($p < 0,01$), enquanto não foi observado efeito significativo nos teores de N e K nas folhas do feijoeiro (Figura 2).

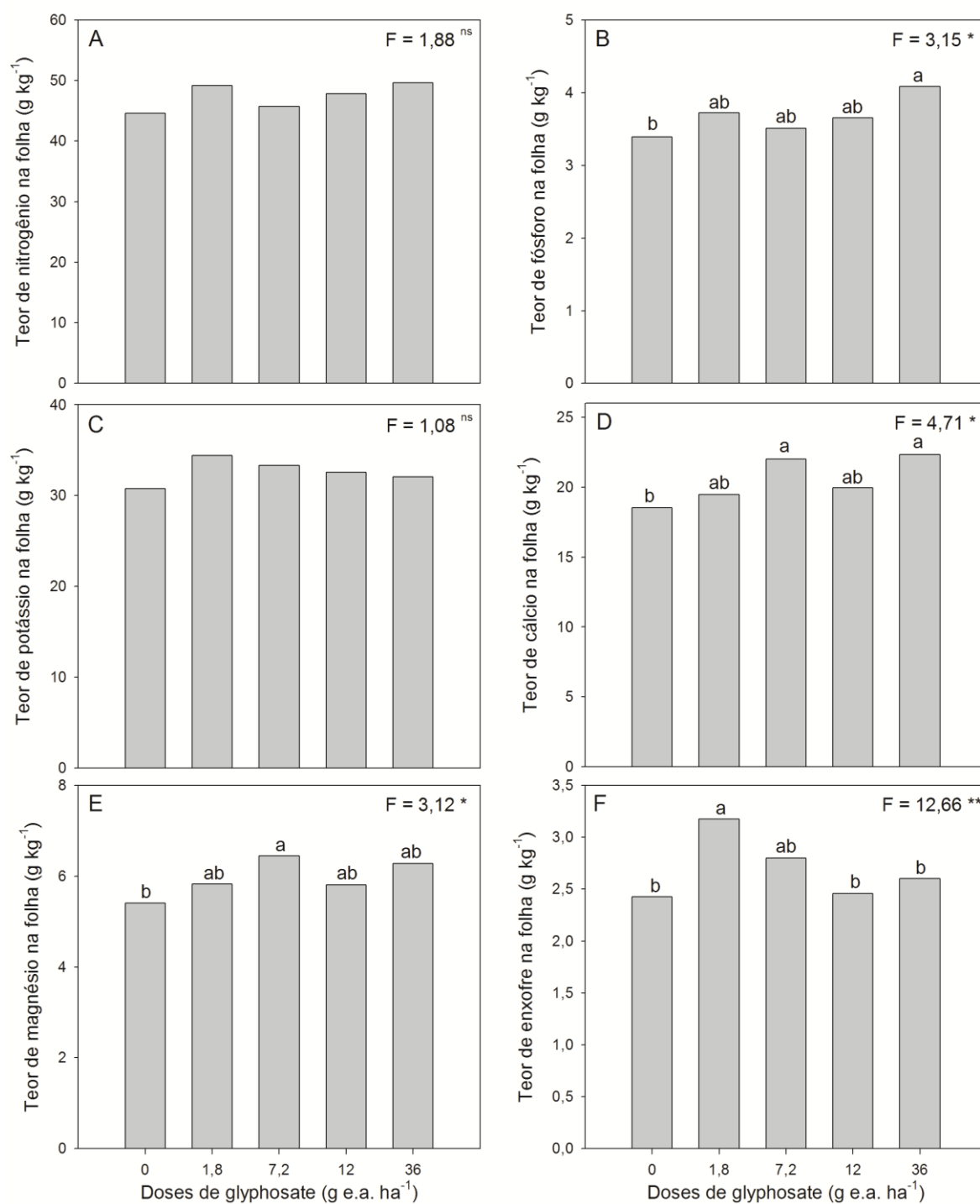
Foram observados aumentos de 20% no teor de P na dose 36 g e.a. ha⁻¹ (Figura 2B), aumento de 19 e 21% no teor de Ca nas doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 2D), e aumento de 19% no teor de Mg na dose 7,2 g e.a.

ha⁻¹ (Figura 2E). Aumento de 31% foi observado para o teor de S nas plantas tratadas com a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ (Figura 2F).

Na safra das águas foi observado efeito das doses de glyphosate nos teores de N ($p<0,05$), P ($p<0,01$), K ($p<0,01$), Ca ($p<0,01$), Mg ($p<0,01$) e S ($p<0,01$) nas folhas do feijoeiro (Figura 3).

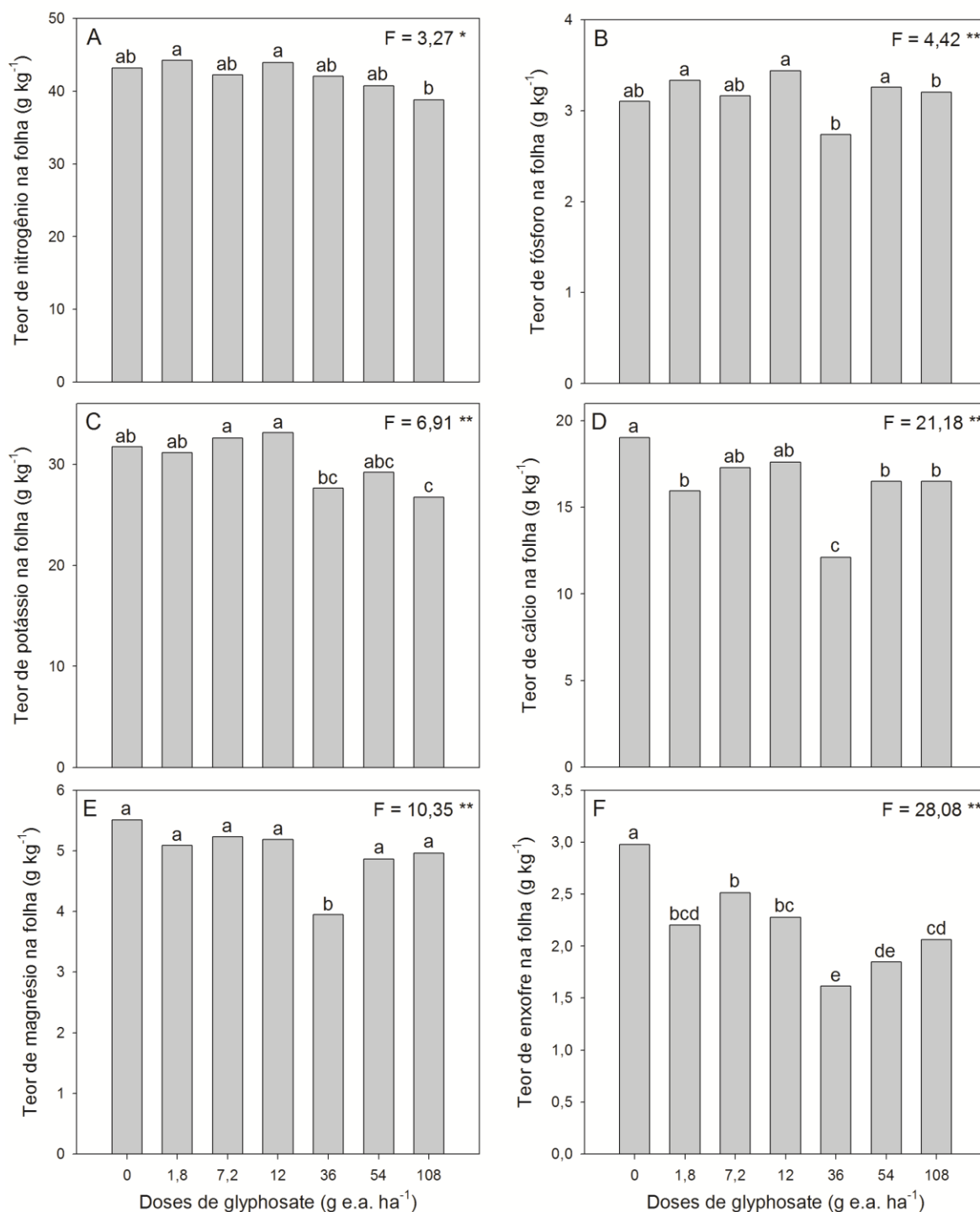
Não foi observada diferença significativa entre a testemunha e os demais tratamentos para o teor de N (Figura 3A) e P (Figura 3B). A dose 108 g e.a. ha⁻¹ reduziu em 16% o teor de K (Figura 3C). As plantas tratadas com as doses 1,8; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ tiveram reduções de 16, 36, 13 e 13%, respectivamente, nos teores de Ca (Figura 3D). A aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 28% no teor de Mg (Figura 3E). As doses 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ reduziram em 26, 16, 23, 46, 38 e 31%, respectivamente, os teores de S (Figura 3F).

Figura 2 - Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e enxofre (F) em folhas de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra de inverno, aos 13 DAA em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Figura 3 - Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e enxofre (F) em folhas de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra das águas, aos 12 DAA em Botucatu – SP, 2016.



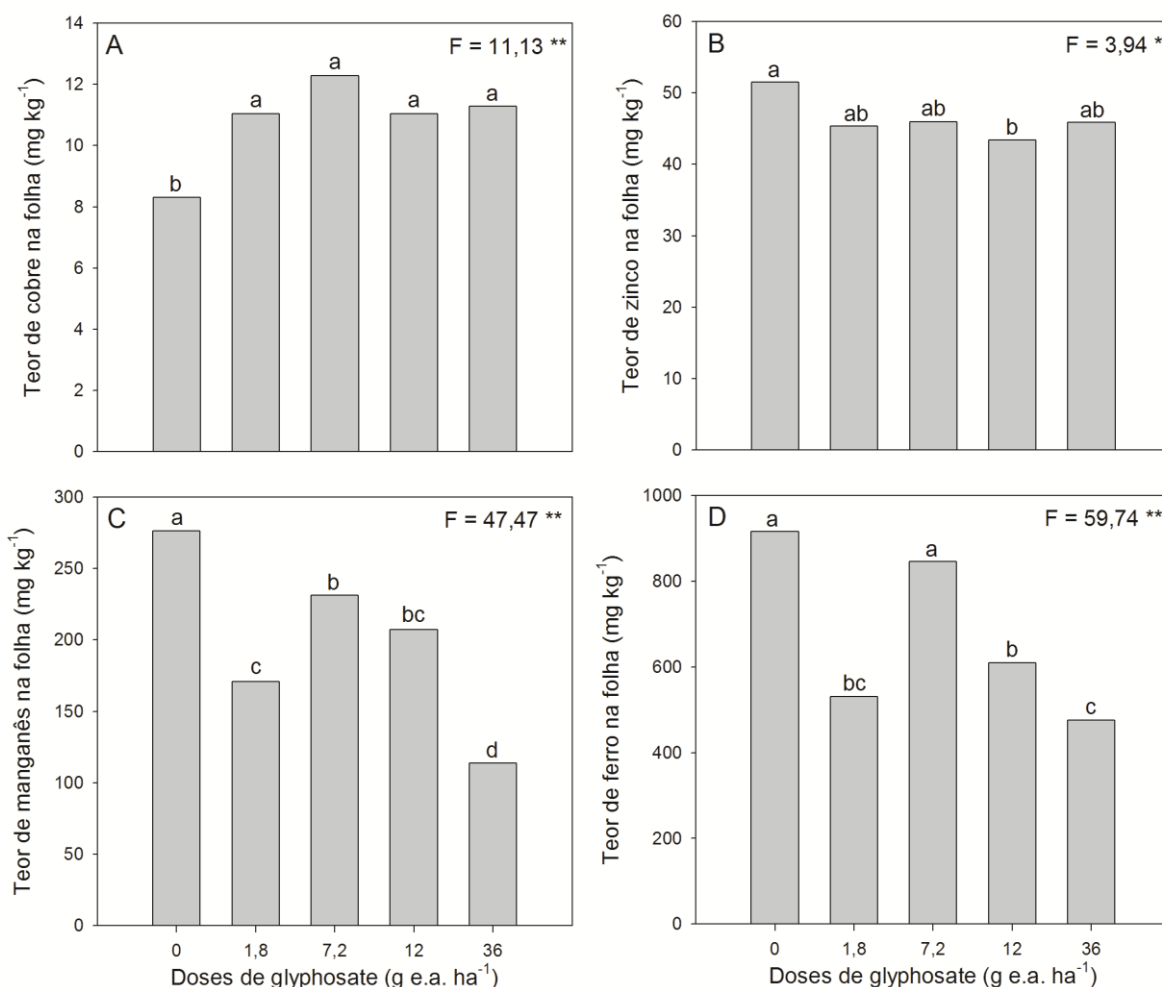
* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

2.3.3 Teor de micronutrientes nas folhas

Aos 13 DAA na safra de inverno foi observado efeito significativo nos teores de Cu ($p < 0,01$), Zn ($p < 0,05$), Mn ($p < 0,01$) e Fe ($p < 0,01$) nas folhas do feijoeiro (Figura 4).

As doses 1,8; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram incrementos de 33, 48, 33 e 36%, respectivamente, nos teores de Cu nas folhas de feijoeiro (Figura 4A). Foi observada redução para o teor de Zn na dose 12 g e.a. ha⁻¹ de 16% (Figura 4B). As doses 1,8; 7,2; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ reduziram em 38, 16, 25 e 59%, respectivamente, os teores de Mn (Figura 4C). Para o teor de Fe, as doses 1,8; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram reduções de 42, 33 e 48%, respectivamente, (Figura 4D).

Figura 4 - Teores de cobre (A), zinco (B), manganês (C) e ferro (D) em folhas de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra de inverno, aos 13 DAA em Botucatu – SP, 2016.



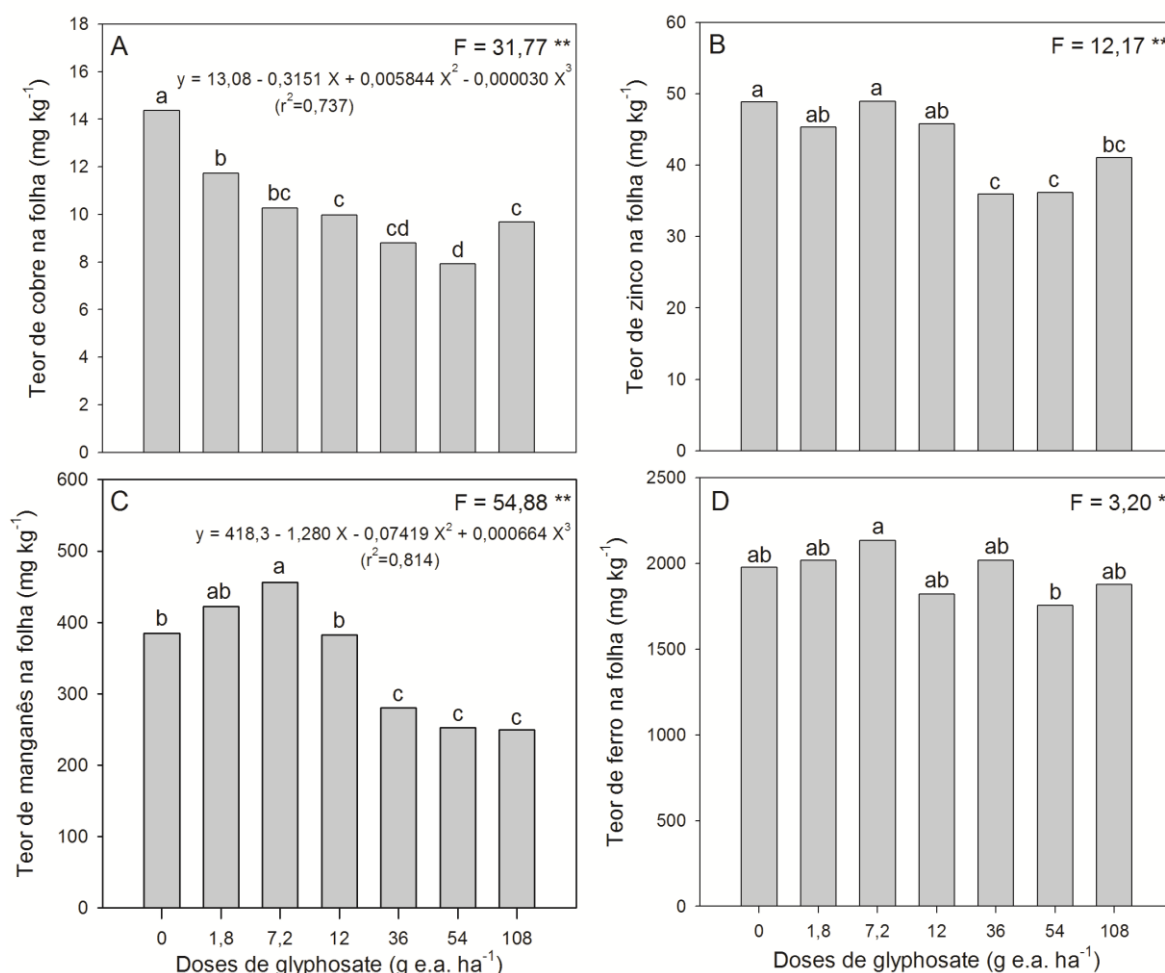
* P≤0,05; ** P≤0,01. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Na safra das águas foi observado efeito significativo das doses de glyphosate no teor de Cu (p<0,01), Zn (p<0,01), Mn (p<0,01) e Fe (p<0,05) nas folhas do feijoeiro (Figura 5).

As doses 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ resultaram em reduções de 18, 29, 31, 39, 45 e 33%, respectivamente, nos teores de Cu (Figura 5A). Em relação ao Zn,

as doses 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ reduziram em 26, 26 e 16%, respectivamente, os teores nas folhas (Figura 5B). Para os teores de Mn, as plantas tratadas com a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ tiveram aumentos de 19%, respectivamente, (Figura 5C), enquanto que, as doses 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram reduções de 27, 34 e 35%, respectivamente. Já no teor de Fe não houve diferença significativa entre a testemunha e os demais tratamentos (Figura 5D). Os teores de Cu e Mn foram ajustados por equação exponencial cúbica (Figura 5A, C).

Figura 5 - Teores de cobre (A), zinco (B), manganês (C) e ferro (D) em folhas de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra das águas, aos 12 DAA em Botucatu – SP, 2016.



* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

2.3.4 Teor de macronutrientes nos grãos

Aos 68 dias após a aplicação das subdoses de glyphosate, na safra de inverno, foi observado efeito significativo das doses de glyphosate nos teores de Ca ($p < 0,01$), Mg ($p < 0,01$) e S ($p < 0,01$) nos grãos, e não foi observado efeito nos teores de N, P e

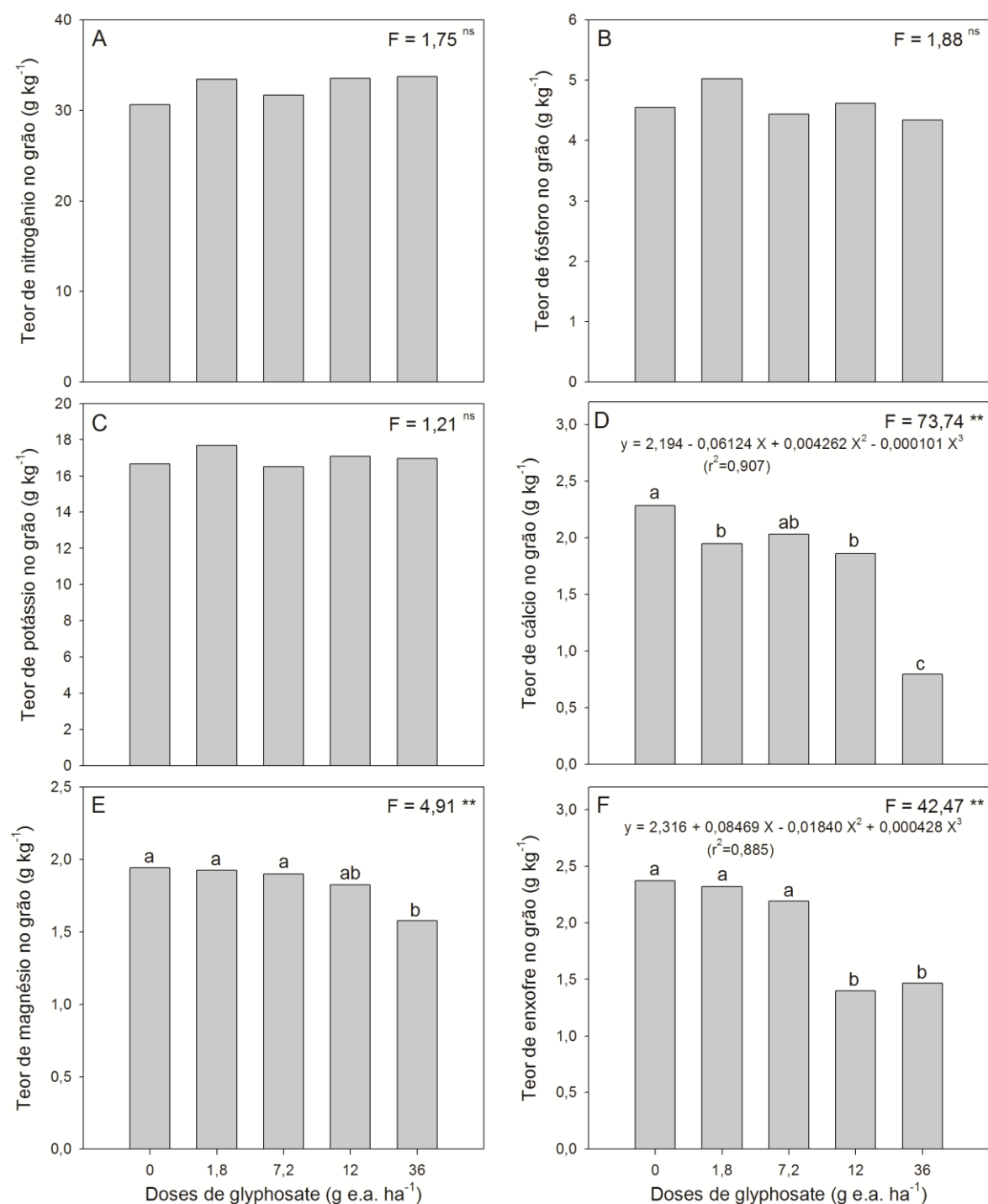
K (Figura 6). O teor de Ca e S foram ajustados por equação exponencial cúbica (Figura 6D, F).

As doses 1,8; 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram reduções de 15, 19 e 65%, respectivamente, nos teores de Ca (Figura 6D). A dose 36 g e.a. ha⁻¹ resultou em redução de 19% no teor de Mg (Figura 6E), e as doses 12 e 36 g e.a. ha⁻¹ resultaram em reduções de 41 e 38%, respectivamente, nos teores de S (Figura 6F).

Na safra das águas, aos 53 dias após a aplicação dos tratamentos, foi observado efeito significativo das doses de glyphosate nos teores de N ($p < 0,01$), P ($p < 0,01$), K ($p < 0,01$), Ca ($p < 0,01$), Mg ($p < 0,01$) e S ($p < 0,01$) dos grãos (Figura 7). O teor de N foi ajustado por equação exponencial quadrática, o teor de P e Ca foram ajustados por equação exponencial cúbica (Figura 7A, B, D).

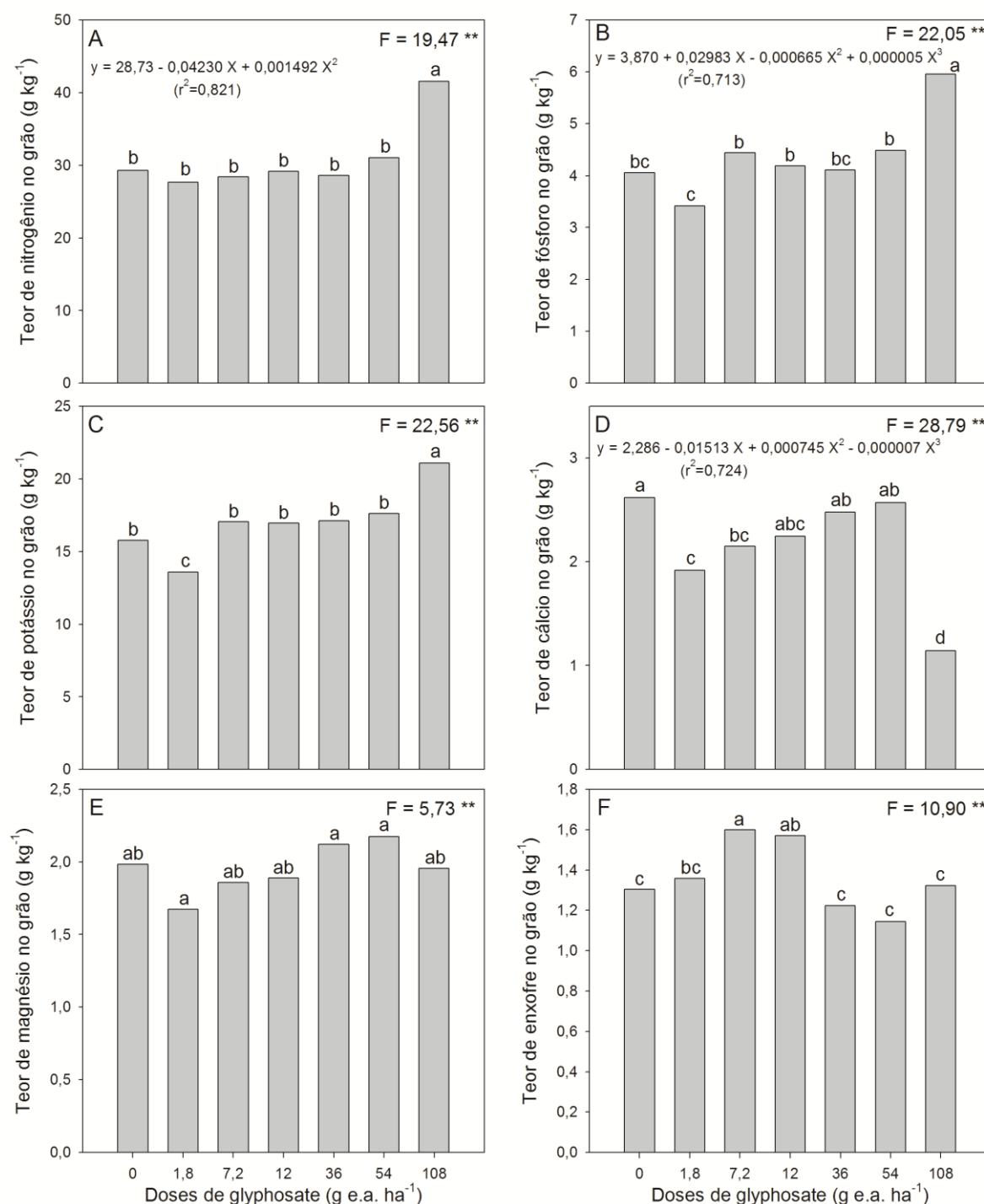
A dose 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionou incrementos nos teores de N, P e K nos grãos de feijoeiro, na ordem de 42, 47 e 34%, respectivamente, (Figura 7A, B, C). A dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ reduziu em 14% o teor de K. Para o teor de Ca, a aplicação das doses 1,8; 7,2 e 108 g e.a. ha⁻¹ levou a reduções de 27, 18 e 56%, respectivamente, (Figura 7D). Já para o teor de Mg, não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 7E). Os teores de S foram aumentados em 23 e 20% com a aplicação das doses 7,2 e 12 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 7F).

Figura 6 - Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e enxofre (F) em grãos de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra de inverno, aos 68 DAA em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** P≤0,01. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Figura 7 - Teores de nitrogênio (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e enxofre (F) em grãos de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra das águas, aos 53 DAA em Botucatu – SP, 2016.



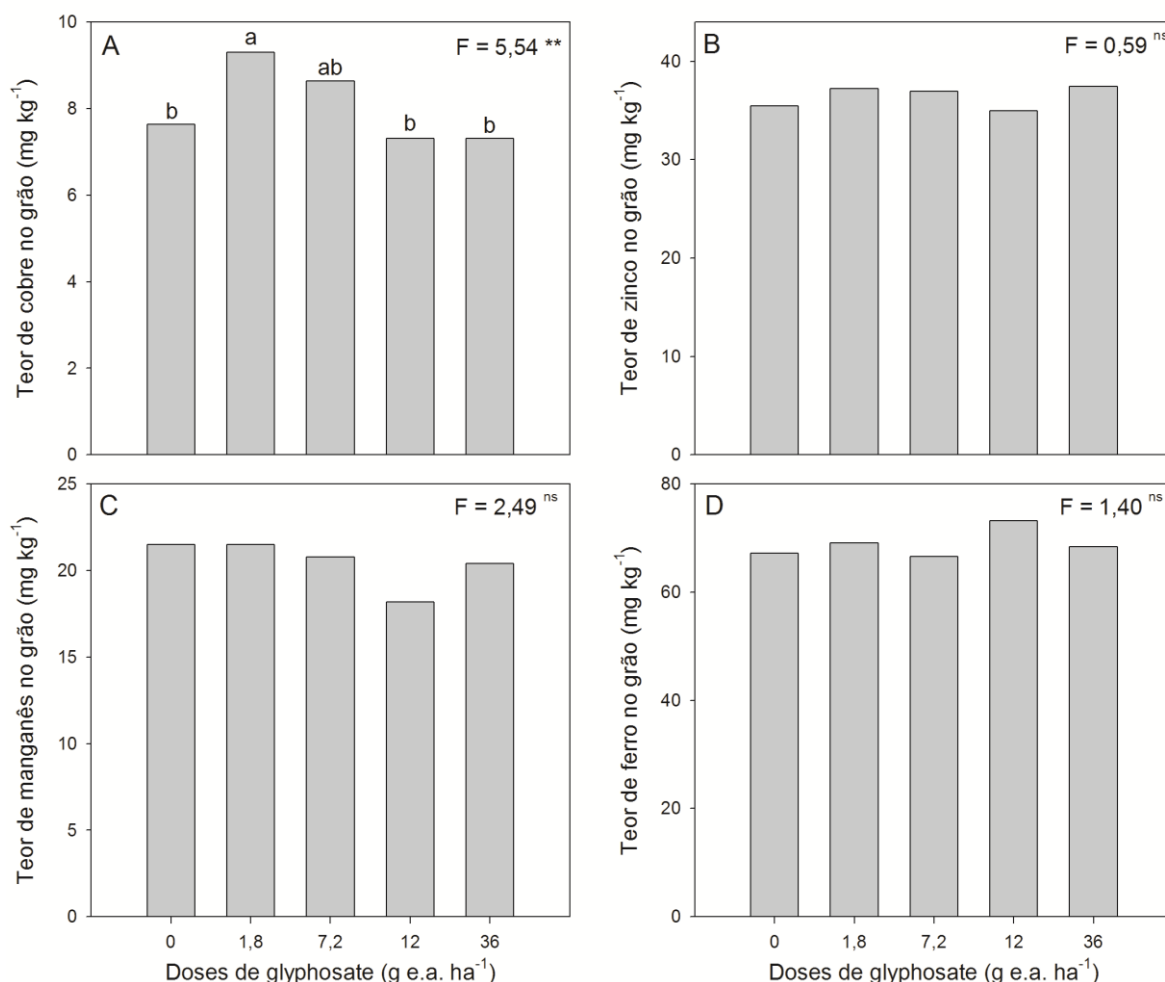
** $P \leq 0,01$. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

2.3.5 Teor de micronutrientes nos grãos

Na safra de inverno, aos 68 dias após a aplicação das subdoses de glyphosate, foi observado efeito significativo no teor de Cu ($p < 0,01$), enquanto que não foi observado efeito no teor de Zn, Mn e Fe nos grãos do feijoeiro (Figura 8).

A dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumento de 22% no teor de Cu nos grãos (Figura 8A).

Figura 8 - Teores de cobre (A), zinco (B), manganês (C) e ferro (D) em grãos de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra de inverno, aos 68 DAA em Botucatu – SP, 2016.



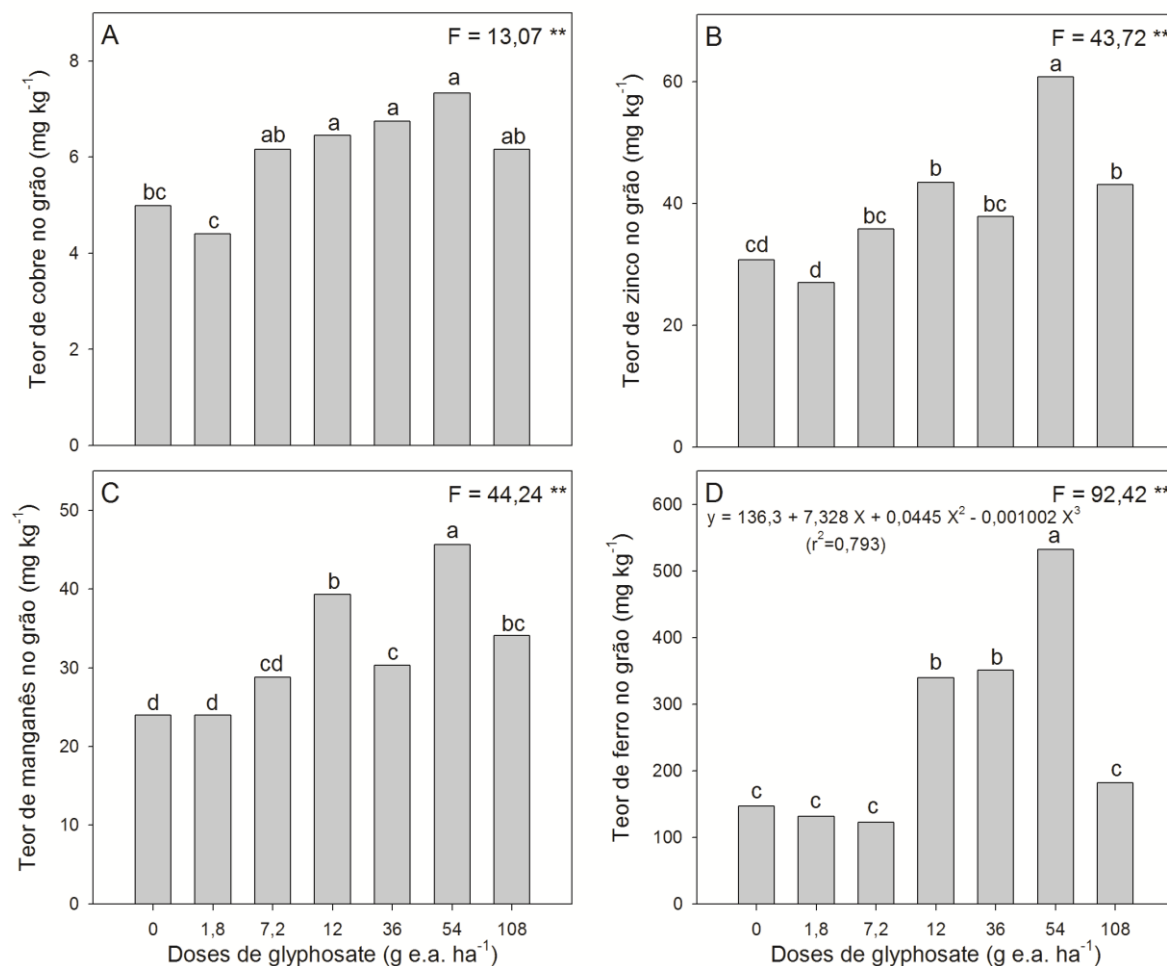
ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

Na safra das águas, aos 53 dias após a aplicação dos tratamentos, foi observado efeito significativo da aplicação de subdoses de glyphosate nos teores de Cu ($p < 0,01$), Zn ($p < 0,01$), Mn ($p < 0,01$), e Fe ($p < 0,01$) nos grãos de feijoeiro (Figura 9). O teor de Fe foi ajustado por equação exponencial cúbica (Figura 9D).

As doses 12; 36 e 54 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram incrementos de 29, 35 e 47%, respectivamente, nos teores de Cu (Figura 9A). As doses 12 e 54 g e.a. ha⁻¹ resultaram em aumento de 41 e 98%, respectivamente, nos teores de Zn (Figura 9B). As doses 12; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram incrementos de 64, 27, 91 e 42%, respectivamente, nos teores de Mn (Figura 9C). Em relação ao Fe, nas

plantas tratadas com as doses 12; 36 e 54 g e.a. ha⁻¹ foi observado aumento de 131, 139, 263%, respectivamente, nos grãos (Figura 9D).

Figura 9 - Teores de cobre (A), zinco (B), manganês (C) e ferro (D) em grãos de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate, na safra das águas, aos 53 DAA em Botucatu – SP, 2016.



** P≤0,01. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey.

2.4 Discussão

As subdoses de glyphosate proporcionaram alterações nos teores de nutrientes das folhas e grãos do feijoeiro de ciclo precoce. Houve variação nos resultados, a qual foi dependente da época de cultivo e do nutriente. Alterações nos teores de nutrientes em função de subdoses de glyphosate também foram observadas por França et al. (2010) em cultivares de café, Rabello et al. (2015) em feijoeiro e Cakmak et al. (2009) em soja convencional.

O crescimento e a produtividade do feijoeiro são favorecidos sob temperaturas médias entre 17,5 a 25,0°C, sendo a temperatura mínima para o desenvolvimento do feijoeiro de 10°C e a máxima de 35°C (VIEIRA et al., 2006; PEREIRA et al.,

2014). As temperaturas em ambas as safras variaram numa faixa mais ampla, com temperaturas mais baixas que a mínima e mais altas que a máxima considerada ideal (Figura 1), tanto que na safra de inverno totalizaram 34 dias com temperaturas abaixo da ideal, enquanto somente nove dias com temperaturas abaixo da ideal na safra das águas. Na safra das águas a temperatura encontrava-se próxima da faixa ideal para a cultura (Figura 1B). Após a aplicação dos tratamentos na safra das águas as temperaturas foram próximas da faixa ideal para a cultura, enquanto na safra de inverno as temperaturas estavam mais baixas.

A temperatura ideal promove o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (DIDONET, 2010), temperaturas mais baixas podem atrasar o desenvolvimento vegetativo do feijoeiro (PEREIRA et al., 2014). No presente trabalho, foi observado prolongamento do ciclo do feijoeiro na safra de inverno (102 DAS), na qual ocorreram temperaturas e comprimento do dia menores, enquanto na safra das águas, com temperatura e dias maiores o ciclo foi menor (92 DAS). De fato, segundo Didonet (2010) é esperado que temperaturas mais altas acelerem o ciclo do feijoeiro. Taxas de assimilação e distribuição de nutrientes e fotoassimilados podem ser alteradas em consequência do aumento da temperatura ambiente (BELL, 2000; DIDONET, 2010). Essas afirmações corroboram as diferenças entre as duas épocas de cultivo apontadas por nossos resultados.

Segundo nossos resultados, não houve efeito significativo da aplicação de subdoses de glyphosate nos teores de N nas safras de inverno e das águas, e seus teores ficaram dentro da faixa ideal recomendada por Malavolta et al. (1997), entre 30 e 50 g kg⁻¹ de N (Figura 2A e 3A).

Na safra de inverno foi observado aumento de 20% no teor de P na dose 36 g e.a. ha⁻¹, enquanto que na safra das águas não houve alterações significativas entre os tratamentos (Figura 2B e 3B). A absorção do glyphosate pode ser auxiliada por transportadores de grupo fosfato presentes na membrana plasmática (HETHERINGTON et al., 1998; PIPKE et al., 1987; RABELLO et al., 2012), portanto é possível que a aplicação de subdoses de glyphosate induzam a atividade dos genes envolvidos na absorção de fósforo e, assim, aumente o teor deste nutriente na planta, bem como a concentração de glyphosate (PERIM et al., 2011).

O P é um nutriente essencial para o crescimento e reprodução dos vegetais. Para o feijoeiro, o P aumenta o número de vagens e a massa dos grãos, auxilia no processo de maturação e qualidade dos grãos e no desenvolvimento do sistema

radicular (FAGERIA et al., 2015). O P é componente de fosfatos, açúcares, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, fosfolipídeos e ácido fítico, e também tem papel central em reações que envolvem ATP (TAIZ et al., 2017).

Na safra das águas houve redução de 16% no teor de K na dose 108 g e.a. ha⁻¹ (Figura 3C). No entanto, os teores de K estavam acima da faixa considerada ideal para o feijoeiro em ambas as safras, de 20 a 25 g kg⁻¹ de K, em todas as doses avaliadas, inclusive para a dose 0 g e.a. ha⁻¹, portanto, este efeito não é devido a aplicação de subdoses de glyphosate. A propósito, a redução do teor de K com aplicação da dose 108 g e.a. ha⁻¹, aproximou-o da faixa considerada ideal. Teores altos de K podem causar deficiência induzida de magnésio (MALAVOLTA et al., 1997), porém este efeito não foi observado neste trabalho.

Após o N, o K é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo feijoeiro, sendo cofator de mais de 40 enzimas, participa do estabelecimento do turgor celular e na manutenção da eletroneutralidade celular (TAIZ et al., 2017).

França et al. (2010), avaliando três cultivares de café após a aplicação de subdoses de glyphosate, observaram reduções nos teores de N, P, K das folhas após 45 dias da aplicação dos tratamentos, no entanto foi observado aumento no teor de Ca, e aos 120 DAA foram observadas reduções nos teores de N e K. Esses resultados foram independentes da cultivar para as duas épocas de avaliação.

No feijoeiro cultivar Pérola foi observado efeito significativo da aplicação de subdoses de glyphosate nos teores de macronutrientes aos 10 e 20 DAA, em que a dose de 86,4 g ha⁻¹ proporcionou reduções de 28, 17 e 28% nos teores de N, P e K, respectivamente, aos 10 DAA, e reduções de 38, 30, 35 e 34% nos teores de N, P, Ca e Mg, respectivamente, aos 20 DAA (RABELLO et al., 2015). Por outro lado, Santos et al. (2007) não observaram efeito de hormese nos teores de P, K, Ca e Mg em eucalipto após a aplicação das subdoses 43,2 e 172,8 g ha⁻¹ de glyphosate.

Ferreira et al. (2008) observaram redução no teor de K após aplicação de glyphosate em azevém (*Lolium multiflorum*) sensível ao herbicida. Rabelo et al. (2015) observaram redução de 28% para o teor de K em folhas de feijoeiro cultivar Pérola submetidas à aplicação de 86,4 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, e da mesma forma França et al. (2010) observaram redução no teor de K em cultivares de café arábica. Por outro lado, não foi observado efeito da aplicação de subdoses de glyphosate no teor de K em feijoeiro cultivar BR1 Xódo (RABELLO et al., 2014), soja convencional (CAKMAK et al., 2009) e eucalipto (SANTOS et al., 2007).

No presente estudo na safra de inverno foi observado aumento no teor de Ca nas doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ e no teor de Mg na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹, portanto, sendo benéfico para o feijoeiro. No entanto, na safra das águas foi observada redução nos teores de Ca nas doses 1,8; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ e no teor de Mg na dose 36 g e.a. ha⁻¹. A maior redução foi causada pela aplicação da dose 36 g e.a. ha⁻¹, resultando em teores de Ca abaixo dos teores considerados ideais segundo Malavolta et al. (1997), entre 15 a 20 g kg⁻¹. Os teores de Mg não ficaram abaixo da faixa considerada ideal para a cultura.

O cálcio é constituinte de parede celular e está relacionado com o alongamento, estabilização e permeabilidade seletiva das membranas celulares, é mensageiro secundário (TAIZ et al., 2017), também atua melhorando a qualidade dos frutos e a fixação das flores, na germinação do grão de pólen e crescimento do tubo polínico (CARVALHO et al., 2014).

Os diferentes resultados entre as safras podem ocorrer pelas diferenças climáticas, como temperatura, radiação solar e outros (DIDONET, 2010; PEREIRA et al., 2011). Na safra de inverno ocorreram 34 dias com temperaturas abaixo da considerada ideal para o feijoeiro, enquanto que, na safra das águas as temperaturas estavam mais próximas da faixa considerada ideal (Figura 1).

Outro fato é a possível formação de complexos estáveis com Ca no solo como uma das razões para a redução no teor de Ca em plantas tratadas com glyphosate (SCHOENHERR; SCHREIBER, 2004; MUELLER et al., 2006; CAKMAK et al., 2009). Por outro lado, o acúmulo de glyphosate nos tecidos de dreno pode induzir a deficiências de Ca pela complexação deste nutriente, o herbicida também pode prejudicar a translocação de Ca para estes tecidos pela imobilização na raiz ou nas folhas. Cakmak et al. (2009) observaram redução nos teores de Ca em folhas e grãos de soja convencional, devido a redução na translocação deste nutriente pela planta. Redução na translocação de Ca em plantas de soja também foi observada por Duke et al. (1983), sendo esta redução atribuída às alterações nas funções fisiológicas das plantas causada pelo herbicida.

Rabello et al. (2014), após aplicação de subdoses de glyphosate, não observaram efeito de hormese nos teores de macronutrientes do feijoeiro cultivar BR1 Xódo, com exceção do teor de fósforo, que teve aumento de 16% na dose de 8,64 g ha⁻¹. Em soja convencional foi observado aumento de 33% no teor de P com valor máximo na dose de 8,64 g ha⁻¹ de glyphosate, enquanto, esta mesma dose

proporcionou redução de 40 e 28% nos teores de Ca e Mg, respectivamente, e não foram observadas alterações no teor de K (CAKMAK et al., 2009). Por outro lado, França et al. (2010) observaram aumento no teor de Ca em plantas de café tratadas com sub doses de glyphosate.

No presente trabalho, na safra de inverno houve aumento no teor de S na dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ de 31%, por outro lado, na safra das águas houve redução no teor de S para todas as doses aplicadas. Apesar dessas variações, não foram observados valores abaixo da faixa ideal para o teor de S, segundo Fageria et al. (2011). O S é encontrado em certos aminoácidos, é constituinte de várias enzimas, coenzimas e vitaminas (TAIZ et al., 2017).

Ferreira et al. (2008) não observaram diferença no teor de S de azevém (*Lolium multiflorum*) após aplicação de glyphosate, assim como Rabello et al. (2014) em feijoeiro cultivar BR1 Xódo e França et al. (2010) em café. Por outro lado, a aplicação de subdoses de glyphosate proporcionou reduções de 15 a 25% nos teores de S de plantas de feijoeiro cultivar Pérola após 10 DAA, os teores de S ficaram abaixo da faixa ideal (RABELLO et al., 2015).

Para os teores de micronutrientes na folha, efeitos prejudiciais foram observados para os teores de zinco, manganês e ferro na safra de inverno (Figura 4), enquanto o teor de cobre aumentou em todas as doses. Na safra das águas foi observada redução no teor de Zn em doses iguais e acima de 36 g e.a. ha⁻¹ (Figura 5B). A dose ótima para Cu e Mn foi 0 g e.a. ha⁻¹, com redução nos valores em doses maiores (Figura 5A, C).

Os micronutrientes são importantes para a ativação de diversas funções fisiológicas da planta, são cofatores de enzimas e componentes de proteínas. A falta destes pode causar impacto na fotossíntese e no crescimento das plantas, além de aumentar a incidência de doenças e outros distúrbios (JOHAL; HUBER, 2009).

A aplicação de 18 e 36 g ha⁻¹ de glyphosate reduziu em 27 a 31% o teor de Cu, 6 a 24% o teor de Zn, 27 a 40% o teor de Mn e 68 a 76% o teor de Fe em folhas de girassol três dias após a aplicação (EKER et al., 2006). Avaliando Fe, Mn e Zn radiomarcados, Eker et al. (2006) observaram que o glyphosate reduziu a absorção e translocação de ⁵⁹Fe, ⁵⁴Mn e, em menores proporções, de ⁶⁵Zn, sendo atribuída a redução do teor de nutrientes nas folhas ao acúmulo destes nas raízes.

No presente trabalho, na safra de inverno, foram observados aumentos nos teores de Cu para todas as doses aplicadas, porém permanecendo dentro da faixa

ideal, e redução no teor de Zn na dose 12 g e.a. ha⁻¹, também com valores dentro da faixa ideal considerada para a cultura, segundo Malavolta et al. (1997). Por outro lado, na safra das águas ocorreram reduções nos teores de Cu e nos teores de Zn. Os teores de Cu, com a aplicação das doses 12; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, ficaram abaixo da faixa considerada ideal, segundo Malavolta et al. (1997), enquanto os teores de Zn permaneceram dentro da faixa considerada ideal (Figuras 4 e 5). A deficiência de Cu pode causar redução no conteúdo de clorofilas, reduz a atividade de enzimas, causando efeito no florescimento e produtividade, e pode também ocasionar inibição na translocação de Ca (FAGERIA et al., 2015).

Em cultivares de café foi observada redução de 35% no teor de Zn das folhas 45 dias após a aplicação de 460,8 g ha⁻¹ de glyphosate (FRANÇA et al., 2010). Em girassol, a absorção e translocação de ⁶⁵Zn foi reduzida 12 horas após a aplicação de 86,4 g ha⁻¹ de glyphosate (EKER et al., 2006). Cakmak et al. (2009) observaram aumento de 31% no teor de Cu em folhas jovens de soja, mas não observaram alterações no teor de Zn após aplicação de 8,64 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate. Por outro lado, não foi observado efeito da aplicação das doses 43,2 e 172,8 g ha⁻¹ de glyphosate no teor de Cu e Zn em eucalipto (SANTOS et al., 2007).

A redução na absorção e translocação de micronutrientes pode ocorrer pela formação de complexos estáveis e imóveis com Fe, Cu e Mn, esses complexos podem ser formados na calda de aplicação, na superfície da folha e no citoplasma (BARJA et al., 2001; UNDABEYTIA et al., 2005; BERNARDS et al., 2005).

Em solução nutritiva foram observadas reduções de 50 a 60% no teor de Mn na folha e no acúmulo de Mn em soja transgênica após a aplicação de glyphosate na dose de 9,6 e 19,2 µg cm⁻², no entanto, em experimento realizado em solo, o teor de Mn nas folhas de soja não teve alteração, enquanto o teor de Zn reduziu significativamente (BOTT et al., 2008). Os autores não observaram a formação de complexos de glyphosate com Fe, Zn, Cu e Mn e nem a imobilização desses micronutrientes nas folhas de soja, porém não foi investigada a imobilização dos nutrientes nas raízes.

Segundo nossos resultados, na safra de inverno houve reduções nos teores de Fe e Mn, porém o Mn permaneceu dentro da faixa considerada ideal para o feijoeiro, segundo Malavolta et al. (1997). Mesmo com as reduções observadas por todas as subdoses de glyphosate, os teores de Fe estavam acima da faixa ideal, porém não existem dados de níveis tóxicos de Fe em feijoeiro (FAGERIA et al., 2015). Na safra

das águas, houve aumento no teor de Mn com aplicação da dose 7,2 g e.a. ha⁻¹, e doses a partir de 36 g e.a. ha⁻¹ reduziram o Mn, porém, não foram observados teores de Mn abaixo da faixa ideal para a cultura.

O glyphosate também pode alterar a atividade da enzima ferro quelato redutase nas células das raízes e assim reduzir a absorção de Fe (EKER et al., 2006). Ozturk et al. (2008) observaram redução de 50% na atividade da enzima ferro quelato redutase em girassol após aplicação de 86,4 g ha⁻¹ de glyphosate. Em deficiência de ferro, a enzima ferro quelato redutase é responsável por reduzir o Fe⁺³ em Fe⁺² para a absorção pela cultura. A redução na atividade da enzima se deve a formação de complexos estáveis de glyphosate com Fe, e esses complexos não podem ser reduzidos (OZTURK et al., 2008).

Sonier e Weger (2010) também observaram redução na atividade da enzima ferro redutase em doses mais altas de glyphosate (500 µM), reduzindo a absorção de ferro, enquanto que doses menores não proporcionaram redução no teor de ferro em *Chorella keslleri*. Em soja convencional foram observadas reduções de 50 e 42% na atividade da enzima ferro redutase, e reduções de 37 e 31% na atividade da enzima em soja transgênica após aplicação de 105 g ha⁻¹ de glyphosate (BELALLOUI et al., 2009).

Cakmak et al. (2009) observaram redução de 7 a 18% no teor de Fe e reduções de 29 a 48% no teor de Mn em plantas de soja convencional após aplicação de 8,6 g ha⁻¹ de glyphosate. Em café a aplicação de subdoses de glyphosate proporcionou redução no teor de Fe para todas as cultivares (FRANÇA et al., 2010). A aplicação de 288 g ha⁻¹ de glyphosate reduziu os teores de Fe e Mn em grama, os teores de Cu e Zn não foram afetados (SENEN SU et al., 2009). Por outro lado, Santos et al. (2007) observaram aumento de 28% teor de Fe em plantas de eucalipto após aplicação de 345,6 g ha⁻¹ de glyphosate, e aumento de 37% no teor de Mn.

A aplicação de 105 g ha⁻¹ de glyphosate em soja convencional proporcionou redução de 33% no teor de Fe das folhas uma semana após a aplicação, e após seis semanas da aplicação o teor de Fe era 44% menor em comparação ao tratamento sem a aplicação do herbicida, indicando que a cultura não recuperou o teor de Fe (BELALLOUI et al., 2009).

Para o teor de macronutrientes nos grãos, na safra de inverno, foram observados efeitos prejudiciais para Ca, sendo a dose 0 g e.a. ha⁻¹ considerada a dose ótima, efeitos prejudiciais também foram observados para Mg a partir da dose

36 g e.a. ha⁻¹ (Figura 6), para S a partir da dose 2,5 g e.a. ha⁻¹, e não ocorreram efeitos nos teores de N, P e K (Figura 6). Na safra das águas foram observados aumentos nos teores de nitrogênio, fósforo e potássio na dose 108 g e.a. ha⁻¹, sendo esta a dose ótima para N e P, este efeito pode ser resultado da concentração destes nutrientes, devido à redução na altura das plantas. Para o teor de cálcio a dose ótima foi de 59 g e.a. ha⁻¹, e houve aumento no teor de enxofre nas doses 7,2 e 12 g e.a. ha⁻¹ (Figura 7).

Cakmak et al. (2009) também observaram alterações no teor de nutrientes nos grãos de soja convencional após aplicação de glyphosate. A dose 17,3 g ha⁻¹ proporcionou incremento de 35% no teor de N e 4% no teor de K, mas não foi observado efeito no teor de P, enquanto que o teor de Ca foi reduzido em 26% e o de Mg em 12%.

As reduções nos teores de Ca e Mg podem ser devidas aos complexos formados pelo glyphosate com esses nutrientes, acumulando-os nas raízes ou folhas das plantas tratadas e não serem translocados para os grãos (CAKMAK et al., 2009).

Em soja transgênica também ocorreu alterações significativas no teor de nutrientes nos grãos. Zobiolo et al. (2010) observaram redução de 16% no teor de P e 18% no teor de Ca, mas não observaram diferença nos teores de N, K, Mg e S com a aplicação de 1200 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate no estágio R1, indicando que os metabólitos do herbicida continuaram ativos na planta até a colheita, e também que a cultura não foi eficiente na recuperação dos efeitos quelantes do glyphosate. As alterações observadas nos macronutrientes dos grãos de soja transgênicos acompanharam as alterações que ocorreram nas folhas de soja (ZOBIOLE et al., 2010).

No presente estudo, na safra de inverno os teores de Ca, Mg e S aumentaram nas folhas, porém reduziram nos grãos, o que pode indicar a formação de complexos com a molécula de glyphosate e assim redução na translocação aos grãos. Enquanto que, na safra das águas foram observadas reduções nos teores de K, Mg e S nas folhas e aumento nos teores destes nutrientes nos grãos de feijoeiro, o que pode indicar que nesta safra a cultura conseguiu se recuperar dos efeitos quelantes do herbicida e assim os nutrientes foram translocados para os grãos.

Os diferentes resultados observados nas safras podem ser explicados por um efeito passageiro do glyphosate sobre as plantas (ZOBIOLE et al., 2012), pois na safra das águas, com temperaturas mais próximas das ideais (Figura 1), houve

maior metabolismo do feijoeiro, o que levou à metabolização do herbicida nas folhas e assim a liberação dos efeitos quelantes. De fato, as alterações nutricionais podem ser afetadas pelos fatores ambientais, como temperatura, precipitação e radiação solar (BELL, 2000; PEREIRA et al., 2011).

Para o teor de micronutrientes nos grãos foi observado na safra de inverno aumento no teor de Cu na dose 1,8 g e.a. ha⁻¹, enquanto os teores de Mn, Zn e Fe não tiveram alterações significativas (Figura 8). Na safra das águas foi observado incremento nos teores de Cu nas doses 12; 36 e 54 g e.a. ha⁻¹, nos teores de Zn nas doses 12; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, nos teores de Mn a partir da dose 12 g e.a. ha⁻¹, e nos teores de Fe nas doses 12; 36 e 54 g e.a. ha⁻¹, com dose ótima de 64 g e.a. ha⁻¹ para o teor de Fe (Figura 9). O aumento no teor de micronutrientes observado nos grãos, em maior proporção na safra das águas, pode refletir em melhorias para a qualidade do alimento.

Em soja convencional foi observado efeito da aplicação de subdoses de glyphosate nos teores de nutrientes nos grãos. A aplicação da dose de 17,2 g ha⁻¹ proporcionou incremento de 18% no teor de Cu e 32% no teor de Zn, enquanto que o teor de Fe reduziu em 49% e o teor de Mn em 45% (CAKMAK et al., 2009). Em soja transgênica também foram observadas alterações no teor de nutrientes dos grãos, com reduções de 22% para o teor de Mn, 13% no de Cu, 5% no de Zn e 20% no de Fe (ZOBIOLE et al., 2010).

Nos grãos de soja convencional, a aplicação de glyphosate três semanas após a semeadura reduziu em 7% o teor de Fe, enquanto que a aplicação oito semanas após a semeadura reduziu em 32% o teor de Fe nos grãos (BELALLOUI et al., 2009), indicando maior redução na absorção e translocação de Fe das raízes para as folhas e das folhas para os grãos quanto mais próxima a aplicação do florescimento.

A redução nos teores de micronutrientes nos grãos pode ser explicada pela formação de complexos estáveis e imóveis com a molécula de glyphosate (CAKMAK et al., 2009, BARJA et al., 2001; UNDABEYTIA et al., 2005; BERNARDS et al., 2005). O glyphosate também pode interferir nos processos de transporte de nutrientes pelo floema (CAKMAK et al., 2009). Os compostos de glyphosate podem continuar nas plantas até a colheita (ZOBIOLE et al., 2010), portanto a redução observada nos macros e micronutrientes pode ter ocorrido devido aos efeitos quelantes do herbicida, formando complexos estáveis e imóveis.

O aumento no teor de micronutrientes pode indicar que a cultura recuperou dos efeitos quelantes do glyphosate (ZOBIOLE et al., 2010, EKER et al., 2006). No presente estudo, na safra de inverno foi observada redução nos teores de Zn, Mn e Fe e aumento no teor de Cu nas folhas, enquanto que não houve alteração significativa nos grãos nos teores de Zn Mn e Fe, e o teor de Cu aumentou em doses menores. Na safra das águas ocorreu redução no teor de Cu, Zn e Mn nas folhas, enquanto que ocorreu aumento no teor de micronutrientes nos grãos, o que pode indicar recuperação dos efeitos quelantes observados nas folhas e a translocação dos nutrientes para os grãos.

Essa recuperação dos efeitos quelantes pode estar associada às condições climáticas do cultivo na época das águas, as quais foram caracterizadas com maiores temperaturas, chuvas mais bem distribuídas e maior comprimento do dia. De acordo com Pereira et al. (2011), as alterações no teor de macro e micronutrientes entre as safras podem ocorrer devido às diferentes condições climáticas.

Assim, de maneira geral, na safra de inverno, a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ aumentou os teores de S e Cu nas folhas e somente foi observado aumento de Cu nos grãos. A dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumentos nos teores de Ca, Mg e Cu somente nas folhas. A dose 12 g e.a. ha⁻¹ incrementou o teor de Cu apenas nas folhas. Sob a dose 36 g e.a. ha⁻¹ houve aumentos nos teores de P, Ca e Cu nas folhas.

Já na safra das águas, a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ aumentou o teor de S nos grãos, a dose 12 g e.a. ha⁻¹ elevou os teores de S, Cu, Zn, Mn e Fe nos grãos, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ aumentou os teores de Cu, Mn e Fe nos grãos, a dose 54 g e.a. ha⁻¹ incrementou os teores de Cu, Zn, Mn e Fe nos grãos e a dose 108 g e.a. ha⁻¹ aumentou os teores de N, P, K, Zn e Mn nos grãos (Figura 4, 5, 8, 9).

Não houve uma única dose que aumentasse a maioria dos nutrientes em folhas e grãos de feijoeiro.

2.5 Conclusão

A aplicação de subdoses de glyphosate alterou, com influência da época de cultivo, os teores de macro e micronutrientes do feijoeiro de ciclo precoce.

Na safra de inverno, as doses 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ elevaram o teor de nutrientes nas folhas de feijoeiro, enquanto nos grãos houve apenas aumento no teor de Cu com a dose 1,8 g e.a. ha⁻¹.

Na safra das águas não houve aumentos nos teores de nutrientes nas folhas de feijoeiro. Já para os grãos houve aumentos nos teores de Cu, Zn, Mn e Fe a partir da dose 12 g e.a. ha⁻¹.

REFERÊNCIAS

- AMBROSANO, E.J. et al. Feijão. In: RAIJ, B. van, CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 194-195. (Boletim Técnico, 100).
- BARJA, B.C.; HERSZAGE, J.; DOS SANTOS AFONSO, M. Iron (III)- phosphonate complexes. **Polyhedron**, v. 20, n. 20, p. 1821-1830, 2001.
- BELLALLOUI N. et al. Simulated glyphosate drift influences nitrate assimilation and nitrogen fixation in non-glyphosate-resistant soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 9, p. 3357-3364, 2006.
- BELLALLOUI, N. et al. Effects of glyphosate application on seed iron and root ferric (III) reductase in soybean cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 20, p. 9569-9574, 2009.
- BERNARDS, M.L.; THELEN, K.D.; MUTHUKUMARAN, R.B. Glyphosate interaction with manganese in tank mixtures and its effect on glyphosate absorption and translocation. **Weed Science**, v. 53, n. 1, p. 787-794, 2005.
- BOTT, S. et al. Glyphosate-induced impairment of plant growth and micronutrient status in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Plant and Soil**, v. 312, n. 1, p. 185-194, 2008.
- CAKMAK I. et al. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 114-119, 2009.
- CALABRESE, E.J.; BALDWIN, L.A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 1, p. 91-97, 2002.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: décimo segundo levantamento – setembro 2018. Brasília: Conab, v. 5, n. 12 148p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 11/01/2019.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: quarto levantamento – janeiro 2019. Brasília: Conab, v. 6, n. 4, 126p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 11/01/2019.
- DIDONET, D.A. Importância do período pré-floração na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 505-512, 2010.

DUKE, S.O. et al. Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere microbiota, and plant disease in glyphosate-resistant crops. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 1, p. 10375-10379, 2012a.

DUKE, S.O. et al. Effects of glyphosate on the mineral content of glyphosate resistant soybeans (*Glycine max*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 1, p. 6764-6771, 2012b.

DUKE, S.O. et al. Influence of glyphosate on uptake and translocation of calcium ion in soybean seedlings. **Weed Research**, v. 23, n. 1, p. 133-139, 1983.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.^a ed. Rio de Janeiro, 2013, 353p.

EKER, S. et al. Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and transport of iron and manganese in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 1, p. 10019-10025, 2006.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3ed. Boca Raton: CRC, 2011. 560 p.

FAGERIA, N.K. et al. **Nutrição mineral do feijoeiro**. 1ed. Brasília-DF: Embrapa, 2015. 394 p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Production 2016**. FAOSTAT. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 10/01/2019.

FERREIRA, E.A. et al. Distribuição de glyphosate e acúmulo de nutrientes em biótipos de Azevém. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 165-173, 2008.

FRANÇA A.C. et al. Teores de nutrientes em cultivares de café arábica submetidos à deriva de glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 877-885, 2010.

FROSSARD, E. et al. Potencial for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 7, p. 861-879, 2000.

HARRIS W.R. et al. Computer simulation of the interactions of glyphosate with metal ions in phloem. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 1, p. 6077-6087, 2012.

HETHERINGTON, P.R. et al. Absorption and efflux of glyphosate by cell suspensions. **Journal of Experimental Botany**, v. 29, n. 320, p. 527-533, 1998.

HOEKSTRA, J.A.; VAN EWIJK, P.H. Alternatives for the no-observed-effect level. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 12, n. 1, p. 187-194, 1993.

IAC. **Cultivares de feijoeiro IAC**. São Paulo: Instituto Agronômico, 2018. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/feijao.php>> Acesso em: 25/04/2018.

JOHAL G.R.; HUBER D.M. Glyphosate effects on diseases of plants. **European Journal of Agronomy** v. 31, n. 3, p. 144-152, 2009.

MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 308p.

MUELLER, T. et al. Comparison of glyphosate salts (isopropylamine, diammonium, and potassium) and calcium and magnesium concentrations on the control of various weeds. **Weed Technology**. v. 20, n. 1, p. 164-171, 2006.

OZTURK, L. et al. Glyphosate inhibition of ferric reductase activity in iron deficient sunflower roots. **New Phytologist**, v. 177, n. 1, p. 899-906, 2008.

PIPKE, R.; SCHULZ, A.; AMRHEIN, N. Uptake of glyphosate by an *Arthrobacter* sp. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 53, n. 5, p. 974-978, 1987.

PERIM, L.; PRANDO, M.B.; ROSOLEM, C.A. Cinética de absorção de fósforo em soja transgênica após aplicação de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 2, p. 143-150, 2011.

PEREIRA, T. et al. Diversidade no teor de nutrientes em grãos de feijão crioulo no estado de Santa Catarina. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 477-485, 2011.

PEREIRA, V.G.C. et al. Exigências agroclimáticas para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 32-42, 2014.

RABELLO, W.S. et al. Growth and phosphorus absorption by commun bean 'Xodó' genotype under effect of glyphosate reduced rates. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 2, p. 204-212, 2012.

RABELLO, W.S.; MONERAT, P.H.; VASCONCELOS JUNIOR, J.F.S. Composição mineral do feijoeiro comum cultivar BR1 Xodó sob efeito hormético de subdoses de glyphosate. **Global Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 86-94, 2014.

RABELLO, W.S. et al. Produção de massa seca e teores de nutrientes do feijoeiro comum submetido à deriva de glyphosate em duas classes de solos. **Revista Ceres**, v. 62, n. 4, p. 384-391, 2015.

REDDY, K.N.; BELLALLOUI, N.; ZABLOTOWICZ, R.M. Glyphosate effect on shikimate, nitrate reductase activity, yield and seed composition in corn. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 3646-3650, 2010.

RIBEIRO, N.D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 1367-1376, 2010.

ROSOLEM, C.A. et al. Manganese uptake and redistribution in soybean as affected by glyphosate. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1915-1922, 2010.

SANTOS, L.D.T. et al. Crescimento e concentração de nutrientes na parte aérea de eucalipto sob efeito da deriva do glyphosate. **Revista Ceres**, v. 13, n. 4, p. 347-352, 2007.

SCHOENHERR, J.; SCHREIBER, L. Interactions of calcium ions with weakly acidic active ingredients slow cuticular penetration: a case study with glyphosate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 1, p. 6546-6551, 2004.

SENEN SU, Y. et al. Turfgrass species response exposed to increasing rates of glyphosate application. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 120-125, 2009.

SONIER, M.B.; WEGER, H.G. Plasma membrane ferric reductase activity of iron-limited algal cells is inhibited by ferric chelators. **Biometals**, v. 23, n. 6, p. 1029-1042, 2010.

SOUZA, A.P. et al. Respiração microbiana do solo sob doses de glyphosate e de imazapyr. **Planta Daninha**, v. 17, n. 3, p. 387-398, 1999.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6a ed. Artmed, 2017, 858p.

VELINI, E.D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

VIEIRA, C.; JÚNIOR, T.J.P.; BORÉM, A. **Feijão**. 2 ed. Viçosa: UFV -Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600p.

UNDABEYTIA, T.; MORILLO, E.; MAQUEDA, C. FTIR study of glyphosate-copper complexes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 1, p. 1918-1921, 2002.

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Glyphosate affects seed composition in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 4517-4522, 2010.

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation and nodulation in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 1, p. 319-330, 2012.

CAPÍTULO 3

TROCAS GASOSAS E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE SUBDOSES DE GLYPHOSATE

Fernanda Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro¹, Marcela Cristina Brunelli-Nascentes¹, Marcelo de Almeida Silva¹

¹UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas. Av. Universitária, 3780, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: ferborto@yahoo.com.br

RESUMO

O efeito estimulatório do uso de baixas doses de um composto tóxico é conhecido como hormese. O efeito de hormese pela aplicação do herbicida glyphosate já foi observado em diversas culturas. É importante avaliar as alterações causadas pela aplicação deste herbicida em características fisiológicas e seus efeitos na produtividade. Deste modo, o objetivo foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações nas características fisiológicas e na produtividade do feijoeiro de ciclo precoce e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura. Foram conduzidos dois experimentos em campo e a cultivar utilizada foi a IAC Imperador, feijoeiro comum de ciclo precoce. O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso, constituído de subdoses de glyphosate aplicadas no estágio fenológico V₄, com quatro repetições. O primeiro experimento foi instalado na safra de inverno e o segundo na safra das águas. Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹), na safra das águas, os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹). Foram avaliados: conteúdo de clorofila *a*, *b*, *total* e carotenoides, taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática, taxa de transpiração, concentração interna de CO₂, eficiência instantânea de carboxilação da rubisco, número de vagens por plantas, número de grãos por planta, número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos. As subdoses de glyphosate entre 1,8 e 36 g e.a. ha⁻¹ não foram prejudiciais ao feijoeiro, enquanto na dose 108 g e.a. ha⁻¹ foram observados efeitos prejudiciais na *A*, *g_s*, *E*, *A/Ci*, número de vagens por planta,

número de grãos por planta e número de grãos por vagem. Na safra de inverno a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ promoveu aumento de produtividade de grãos. Na safra das águas, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ promoveu aumento na produtividade de grãos.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., hormese, trocas gasosas, componentes da produção.

ABSTRACT

The stimulatory effect of low dose use of a toxic compound is known as hormesis, the hormesis effect by the application of glyphosate has already been observed in several cultures. It is important to evaluate the changes caused by the application of this herbicide in physiological characteristics. Thus, the objective of this work was to evaluate if the application of glyphosate low doses promotes changes in common bean physiological characteristics and grain yield and whether these effects are influenced by the planting seasons. Two experiments were conducted in the field and the cultivar used was the IAC Imperador, common bean of early cycle. The experimental design was a randomized block design, consisting of doses of glyphosate and one season of application (phenological stage V₄), with four replications. The first experiment were carried out in the winter season and the second in the water season. In the winter season, treatments consisted of five glyphosate sub-doses (0, 1.8, 7.2, 12 and 36 g of acid equivalent (a.e.) ha⁻¹), in the water season, treatments consisted of seven subdoses of glyphosate (0.8, 7.2, 12, 36, 54 and 108 g of a.e. ha⁻¹). Chlorophyll *a*, *b*, *total* and carotenoids content, CO₂ assimilation rate, stomatal conductance, transpiration rate, CO₂ internal concentration, instantaneous carboxylation efficiency of rubisco, number of pods per plant, number of grains per plant, number of grain per pod, mass of 1000 grains and grain yield were evaluated. Glyphosate low doses between 1.8 and 36 g a.e. ha⁻¹ were not harmful to common bean, while, the dose 108 g a.e. ha⁻¹ provided harmful effects to *A*, *g_s*, *E*, *A/Ci*, number of pods per plant, number of grains per plant and number of grains per pod. In the winter season, the dose 7.2 g a.e. ha⁻¹ promoted an increase in grain yield. In the water season, the dose 36 g a.e. ha⁻¹ promoted an increase in grain yield.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., hormesis, gas exchange, yield components.

3.1 Introdução

A produção mundial de feijão em 2017 foi de 31,4 milhões de toneladas, com produtividade de 862 kg ha⁻¹ e área colhida de 36,4 milhões de hectares (FAO, 2017). A produção total de feijão no Brasil na safra de 2017/18 foi de 3,1 milhões de toneladas, com área semeada de 3,2 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média total de 969 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Para a safra 2018/19, a estimativa é de 3,1 milhões de hectares de área plantada, com 1.002 kg ha⁻¹ de produtividade e produção total de 3,1 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

No Brasil, o cultivo do feijoeiro se estende por praticamente todo o território nacional, é utilizado como fonte de proteína e minerais por grande parte da população brasileira e em países em desenvolvimento. O consumo é estimado em 14 kg hab⁻¹ ano⁻¹ no país (CONAB, 2018).

A semeadura do feijoeiro no estado de São Paulo ocorre em três épocas distintas, a primeira safra é conhecida como safra das águas, é semeada de agosto a setembro, a segunda safra ou safra da seca é semeada de janeiro a fevereiro e na terceira safra ou safra de inverno a semeadura ocorre nos meses de abril a junho.

Atualmente, os programas de melhoramento do feijoeiro têm buscado a produção de cultivares de ciclo precoce, porém, em condições ideais de temperatura e umidade e com bom índice de precipitação, as cultivares de feijoeiro precoce produzem menos em comparação às cultivares de ciclo normal (VALE et al., 2015). As cultivares de ciclo precoce são dependentes do manejo cultural para atingir elevado potencial produtivo. Sendo assim, é de fundamental importância o uso de tecnologias que possam melhorar a produção do feijoeiro de ciclo precoce.

Uma tecnologia para aumentar a produtividade do feijoeiro de ciclo precoce pode ser a hormese. A hormese é definida como uma resposta adaptativa, caracterizada por efeito bifásico de dose resposta, em que, pode ocorrer efeito estimulatório do uso de baixas doses de composto tóxico, ou inibição em doses elevadas, esta resposta pode ser induzida diretamente ou pode ser o resultado de efeitos compensatórios dos processos biológicos após inicial rompimento na homeostase (CALABRESE; BALDWIN, 2002).

O efeito estimulatório de hormese pela aplicação do herbicida glyphosate foi observado na massa de matéria seca de soja convencional, milho, eucalipto, *Pinus caribea* L. e *Commelina benghalensis* (VELINI et al., 2008), na altura e massa de

matéria seca de cana-de-açúcar (SILVA et al., 2009), *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (NASCENTES et al., 2015), café (CARVALHO et al., 2013) e também na produtividade de cevada (CEDERGREEN et al., 2009) e feijoeiro (SILVA et al., 2016), por outro lado, foi observada redução na massa de matéria seca do feijoeiro (SILVA et al., 2016), *Avena sativa* (TAVARES et al., 2015) e *Bidens pilosa* (SILVA et al., 2014). O estímulo detectado varia de acordo com a espécie avaliada e entre as espécies a dose que promove o maior estímulo também é variável (BELTZ, 2008; VELINI et al., 2008) e a fase fenológica da cultura em que ocorre a aplicação também pode influenciar na resposta observada (SILVA et al., 2016). O glyphosate é amplamente utilizado como regulador de crescimento em cana-de-açúcar, em doses que variam entre 108 a 216 g e.a. ha⁻¹ (SILVA et al., 2009).

Silva et al. (2012), avaliando cultivares de feijoeiro Carioca, Juriti e Pérola, e subdoses (0, 10, 20, 30 e 40 g e.a. ha⁻¹) de glyphosate observaram redução na massa de 100 grãos nas três cultivares após a aplicação de 30 e 40 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate na safra de inverno. Na cultivar Carioca houve redução de 30% na produtividade de grãos na dose 30 g e.a. ha⁻¹, enquanto nas cultivares Juriti e Pérola ocorreu aumento de 7,5 a 10% na produtividade de grãos com a dose 10 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Em outro estudo, Silva et al. (2016) avaliaram diferentes épocas de aplicação de 0, 3, 6, 9, 12 e 15 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate na cultura do feijoeiro na safra de inverno, cultivar Juriti, observando que a aplicação das subdoses parceladas, no estágio vegetativo V₄₋₄ e V₄₋₇ com o aumento das subdoses, proporcionou os maiores incrementos de produtividade, aplicações apenas em V₄₋₄ também incrementaram a produtividade, porém em menor escala, enquanto a aplicação apenas em V₄₋₇ não proporcionou resposta positiva.

Beltz e Cedergreen (2010) observaram que o efeito de hormese, bem como a amplitude da resposta variou com alterações no ambiente em que a cultura está inserida, como temperatura, disponibilidade de nutrientes e radiação solar. Segundo os autores, esta variabilidade de resposta pode dificultar a reprodutibilidade dos efeitos de hormese, principalmente em aplicações no campo. Beltz (2008) também verificou alterações na resposta de hormese devido à temperatura, e Cedergreen e Olesen (2010) justificaram tais alterações devido a mudanças na concentração de CO₂ do ambiente e radiação solar.

A hipótese foi de que pode ocorrer alteração de resposta do feijoeiro com aplicação em diferentes épocas de cultivo. O objetivo foi avaliar se a aplicação de subdoses de glyphosate promove alterações nas trocas gasosas, clorofilas e na produtividade do feijoeiro de ciclo precoce e se esses efeitos são influenciados pelas épocas de semeadura da cultura.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Descrição da área experimental

Foram conduzidos dois experimentos em campo, na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas FCA/UNESP, localizada no município de Botucatu (22°51'01" latitude Sul e 48°25'55" longitude Oeste e altitude 800,1 m), estado de São Paulo, Brasil. O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, clima temperado quente (mesotérmico), com chuvas de verão e seca no inverno, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. O solo da área foi classificado como Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa (EMBRAPA, 2013).

Na safra de inverno o pH do solo era 4,7, matéria orgânica 21 g dm⁻³, 57 g dm⁻³ de P, com 5; 84; 2,6; 40 e 11 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 53 mmol dm⁻³, CTC de 137 mmol dm⁻³ e V% 39, 0,55; 6,5; 60; 20,2 e 1,6 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente. Na safra das águas, o pH era 4,7, 28 g dm⁻³ de M.O, 57 g dm⁻³ de P, com 4; 76; 2,7; 33 e 10 mmol dm⁻³ de Al, Al+H, K, Ca e Mg, soma de bases de 46 mmol dm⁻³, CTC de 122 mmol dm⁻³ e V% 37, 0,56; 8,6; 33; 60,5 e 4,7 mg dm⁻³ de boro, cobre, ferro, manganês e zinco respectivamente.

Os dados climáticos de temperatura e precipitação durante o período experimental foram coletados da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, campus de Botucatu – SP.

3.2.2 Material vegetal

A cultivar utilizada foi a IAC Imperador. Essa cultivar é caracterizada por hábito de crescimento determinado, porte de planta semi-ereto, ciclo precoce, em torno de 60-75 dias, possui flores brancas. Os grãos são classificados no grupo comercial Carioca, é de cor bege clara com listras marrons claras, com cerca de 21% de proteína, possui massa de mil grãos de 270 gramas e potencial produtivo de 4.600

kg ha⁻¹. É recomendado para a semeadura no estado de São Paulo, Brasil, para as três épocas de cultivo (águas, seca e inverno). É resistente ao fungo *Fusarium oxysporum* e a algumas raças do fungo *Colletotrichum lindemuthianum*, causador da antracnose (IAC, 2018).

3.3.3 Tratamento e delineamento experimental

Dois experimentos foram realizados, na safra de inverno e na safra das águas, ambos no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada parcela experimental possuía 10 metros de comprimento, com cinco linhas, espaçamento entre linhas de 0,45 m, utilizando-se de 10 a 12 sementes por metro.

Na safra de inverno, os tratamentos consistiram em cinco subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12 e 36 g de equivalente ácido (e.a.) ha⁻¹) e na safra das águas, os tratamentos consistiram em sete subdoses de glyphosate (0; 1,8; 7,2; 12; 36; 54 e 108 g de e.a. ha⁻¹). Os tratamentos foram aplicados no estágio fenológico V4 da cultura, em ambos os experimentos, correspondente ao maior período de crescimento vegetativo.

3.3.4 Condução do experimento e aplicação dos tratamentos

A semeadura do feijoeiro na safra de inverno ocorreu no dia 31 de março de 2016 e na safra das águas no dia 30 de agosto de 2016.

A adubação de semeadura foi baseada na análise de solo e no Boletim 100 (AMBROSANO et al., 1996), foram utilizados 150 kg ha⁻¹ de 8-28-16 (NPK) em ambos os experimentos.

Quando houve ausência de chuvas, irrigação suplementar por aspersão foi utilizada para o suprimento adequado de água à cultura. Durante a condução dos experimentos o controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado segundo as recomendações técnicas para a cultura na região.

A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada em ambos os experimentos com aplicação de 40 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 20 dias após a semeadura (DAS).

A aplicação dos tratamentos ocorreu em 04 de maio de 2016 na safra de inverno (34 DAS), as condições climáticas foram temperatura média de 19,17°C, com temperatura máxima de 25,21°C, temperatura mínima de 14,98°C, umidade relativa de 69,81, com ausência de ventos. E em 08 de outubro de 2016 na safra das águas (39 DAS) as condições climáticas foram temperatura média de 20,08°C, com

temperatura máxima de 28,43°C, temperatura mínima de 12,85°C, umidade relativa de 61,68, com ausência de ventos. Em ambos os experimentos houve precipitação no quarto dia após a aplicação dos tratamentos.

A aplicação do glyphosate foi realizada por meio de um pulverizador costal pressurizado (CO₂), com barra de pulverização com cinco pontas de latão tipo Magnum defletor 0,50, volume de calda de 200 L ha⁻¹ e pressão de aplicação de 2 bar. Foi utilizado o herbicida Roundup® original, com composição de equivalente ácido de N-(fosfonometil) glicina (360 g L⁻¹), sal de isopropilamina (480 g L⁻¹) e ingredientes inertes (684 g L⁻¹).

A colheita ocorreu em 11 de julho de 2016 na safra de inverno (102 DAS) e em 01 de dezembro de 2016 na safra das águas (92 DAS).

As variáveis fisiológicas, conteúdo de clorofila e trocas gasosas foram medidas aos 13 e 21 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA) na safra de inverno e aos 10 e 16 DAA na safra das águas. Os componentes de produção foram medidos na colheita.

3.3.5 Variáveis fisiológicas

3.3.5.1 Conteúdo de clorofila e carotenoides

Para determinação do conteúdo de clorofila *a*, *b*, *total*, relação *a/b*, e carotenoides, três discos foliares, de área 0,282 cm² cada, foram amostrados entre a borda da folha e a nervura central da lâmina foliar de uma planta por parcela, por meio de um furador de papel. O conteúdo de clorofilas e carotenoides foi determinado segundo a metodologia de Lichtenthaler (1987), em que o método consiste na utilização de 1 mL do extrato obtido a partir da extração por ácido dimetil-formamida (DMF). Os conteúdos de pigmentos foram determinados após 24 h, retirando-se 1 mL do extrato e diluindo em 1 mL de água deionizada para efetuar as leituras de absorbância em espectrofotômetro (Shimadzu, UV-2700, Kyoto, Japão) nos comprimentos de onda 480, 647 e 664 nm.

3.3.5.2 Taxa de assimilação de CO₂ (*A*), condutância estomática (*g_s*), taxa de transpiração (*E*), concentração interna de CO₂ (*C_i*) e Eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*)

A taxa de assimilação de CO₂ (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹), condutância estomática (mmol m⁻² s⁻¹), taxa de transpiração (mmol H₂O m⁻² s⁻¹) e concentração interna de CO₂

($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ de ar) foram determinadas no terço superior da planta, em folha totalmente expandida, utilizando o aparelho analisador de trocas gasosas por radiação infravermelha (modelo LI-6400, LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA), realizado em luz ambiente. As variáveis foram medidas no período da manhã, entre 8:30 e 11:00 horas.

Foi estimada a atividade da rubisco através da eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), que foi calculada pela relação da taxa de assimilação de CO_2 e concentração interna de CO_2 na folha.

3.3.6 Componentes de produção

3.3.6.1 Número de vagem planta⁻¹

Foi determinado mediante a contagem do número de vagens por planta, avaliado em dez plantas coletadas dentro da área útil de cada unidade experimental.

3.3.6.2 Número de grãos planta⁻¹

Foi determinado mediante a contagem do número de grãos por planta, avaliado em dez plantas coletadas dentro da área útil de cada unidade experimental.

3.3.6.3 Número de grãos vagem⁻¹

Foi determinado mediante a relação entre número total de grãos e o número total de vagens, avaliados em dez plantas coletadas dentro da área útil de cada unidade experimental.

3.3.6.4 Massa de 1000 grãos

Obtida por meio da pesagem de oito sub-amostras de 100 sementes por parcela, cujas massas foram determinadas em balança analítica de precisão, sendo tais procedimentos efetuados segundo prescrições estabelecidas pelas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

3.3.6.5 Produtividade de grãos

As plantas foram colhidas e trilhadas manualmente considerando-se as três fileiras centrais e descartado um metro em cada extremidade, totalizando 4 m² de área colhida. Os grãos foram pesados em balança analítica de precisão, a massa obtida foi corrigida para 13% de umidade e convertida a kg ha⁻¹.

3.3.7 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância sendo suas médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

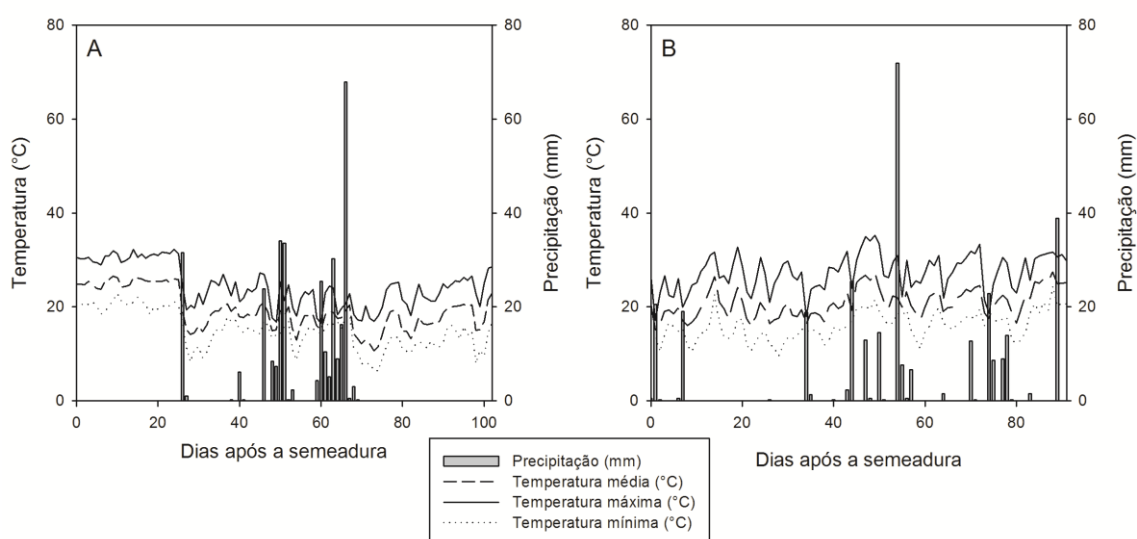
3.4 Resultados

3.4.1 Condições climáticas durante o experimento

Durante a safra de inverno a temperatura média do ar variou de 10,6 a 26,5°C desde a semeadura até a colheita, com temperatura média de 19,2°C, e a precipitação total foi de 321,0 mm (Figura 1A). Após a aplicação dos tratamentos, a temperatura média do ar variou de 10,6 a 23,0°C, com temperatura média de 17,3°C. A safra de inverno ocorre no período de outono-inverno, o qual é caracterizado por menor comprimento do dia, e assim, menos incidência de radiação solar.

Durante a safra das águas, a temperatura média do ar variou de 9,5 a 35,2°C, com temperatura média de 20,8°C, enquanto a precipitação total foi de 313,4 mm (Figura 1B). Após a aplicação dos tratamentos, a temperatura média do ar variou de 16,5 a 27,4°C, com temperatura média de 22,3°C. Esta safra ocorre no período de inverno-primavera, sendo caracterizada pelo aumento no comprimento dos dias, e assim, aumento da incidência de radiação solar.

Figura 1 – Temperatura do ar mínima, média e máxima e precipitação durante o período experimental de março a julho de 2016, safra de inverno (A) e agosto a dezembro de 2016, safra das águas (B). Botucatu – SP, 2016.



3.4.2 Conteúdo de clorofila

A aplicação de subdoses de glyphosate proporcionou efeito significativo ($p < 0,05$) no conteúdo de clorofila *b* e *a/b* das plantas de feijoeiro na safra de inverno, aos 13 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA), porém não foi observado efeito no conteúdo de clorofila *a*, *total* e carotenoides (Figura 2). Foi observada redução no conteúdo de clorofila *b* nas plantas tratadas com a dose 12 g e.a. ha⁻¹, com redução de 23% em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹ (Figura 2B), no entanto, foi observado aumento de 24% na relação de clorofila *a/b* para esta mesma dose (Figura 2E).

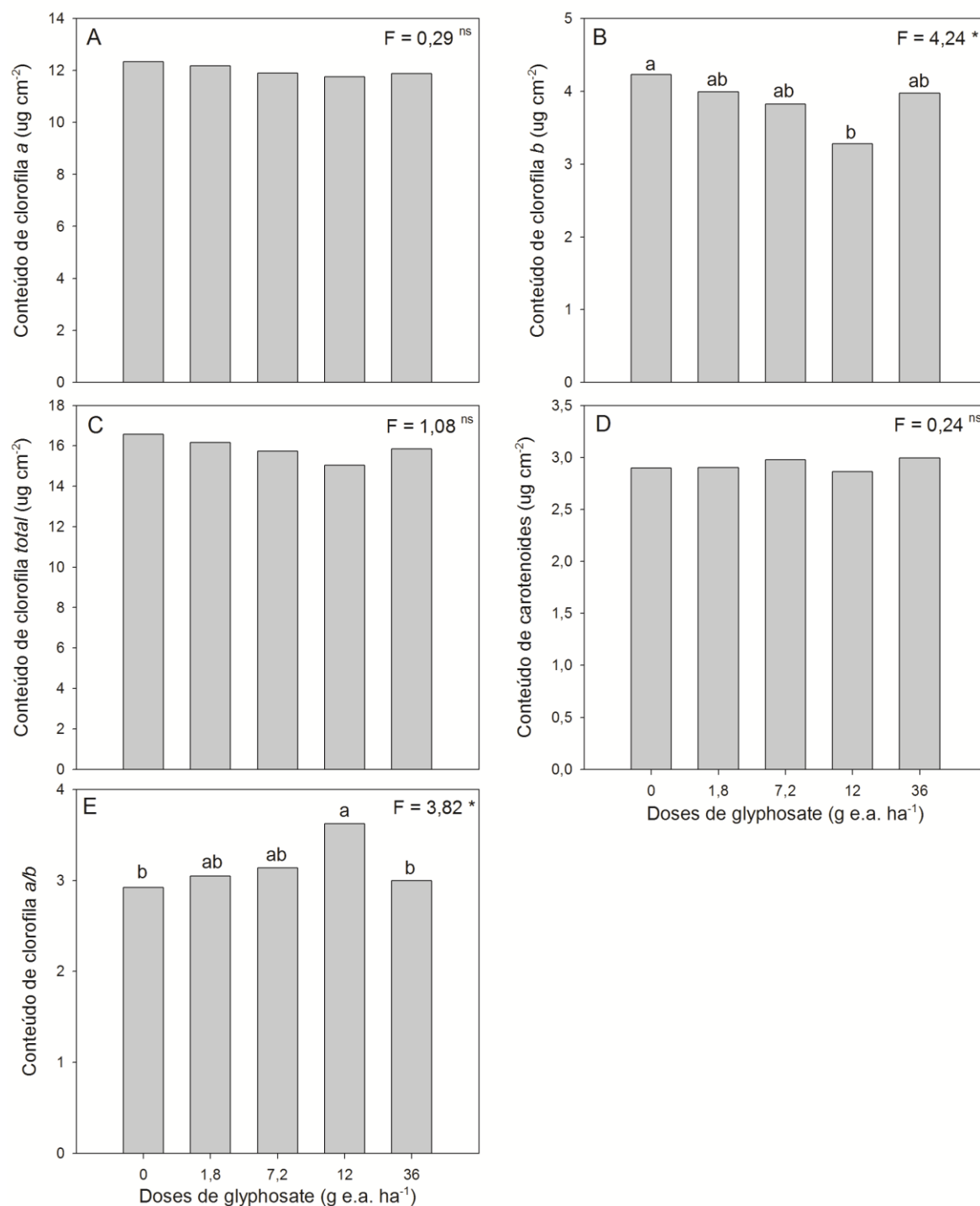
Aos 21 dias após a aplicação dos tratamentos foi observada diferença significativa ($p < 0,01$) no conteúdo de clorofila *a*, *b*, *total* e carotenoides e na relação clorofila *a/b* ($p < 0,05$). Para o conteúdo de clorofila *a* foi observado aumento na dose 1,8 e 36 g e.a. ha⁻¹, com 14% de incremento (Figura 3A). Em relação ao conteúdo de clorofila *b*, houve redução de 18% após aplicação da dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ (Figura 3B). Para o conteúdo de clorofila *total*, os maiores valores, 18,36 e 18,40 µg cm⁻², foram observados nas doses 1,8 e 36 g e.a. ha⁻¹, respectivamente, porém não diferiram significativamente da dose 0 g e.a. ha⁻¹ (Figura 3C). Foi observado aumento no conteúdo de carotenoides, em que o maior foi verificado na dose 36 g e.a. ha⁻¹ (21%), em seguida na dose 12 g e.a. ha⁻¹ (20%) e na dose 1,8 g e.a. ha⁻¹ (17%) (Figura 3D). A relação *a/b* aumentou em 19% na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ (Figura 3E).

Na safra das águas, foi observada diferença significativa ($p < 0,01$) aos 10 dias após a aplicação de subdoses de glyphosate para conteúdo de clorofila *a*, *b*, *total*, carotenoides e na clorofila *a/b* ($p < 0,05$). A aplicação da dose 54 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 19% no conteúdo de clorofila *a* (Figura 4A). Para o conteúdo de clorofila *b* não foram observados diferenças significativas em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹, apesar da redução de 17% causada pela dose 54 g e.a. ha⁻¹ (Figura 4B). O conteúdo de clorofila total foi reduzido em 18% com a aplicação da dose 54 g e.a. ha⁻¹ (Figura 4C). O conteúdo de carotenoides aumentou 15% com a aplicação da dose 12 g e.a. ha⁻¹ (Figura 4D). Para a clorofila *a/b* não foram observados diferenças significativas em relação à dose 0 g e.a. ha⁻¹ (Figura 4E).

Aos 16 DAA foi observado efeito significativo ($p < 0,01$) para a clorofila *a*, *b*, *total*, carotenoides e clorofila *a/b*. As doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram incrementos de 30 e 55%, respectivamente, no conteúdo de clorofila *a* (Figura 5A), de 19 e 29%, respectivamente, no conteúdo de clorofila *b* (Figura 5B), de 26 e 46%,

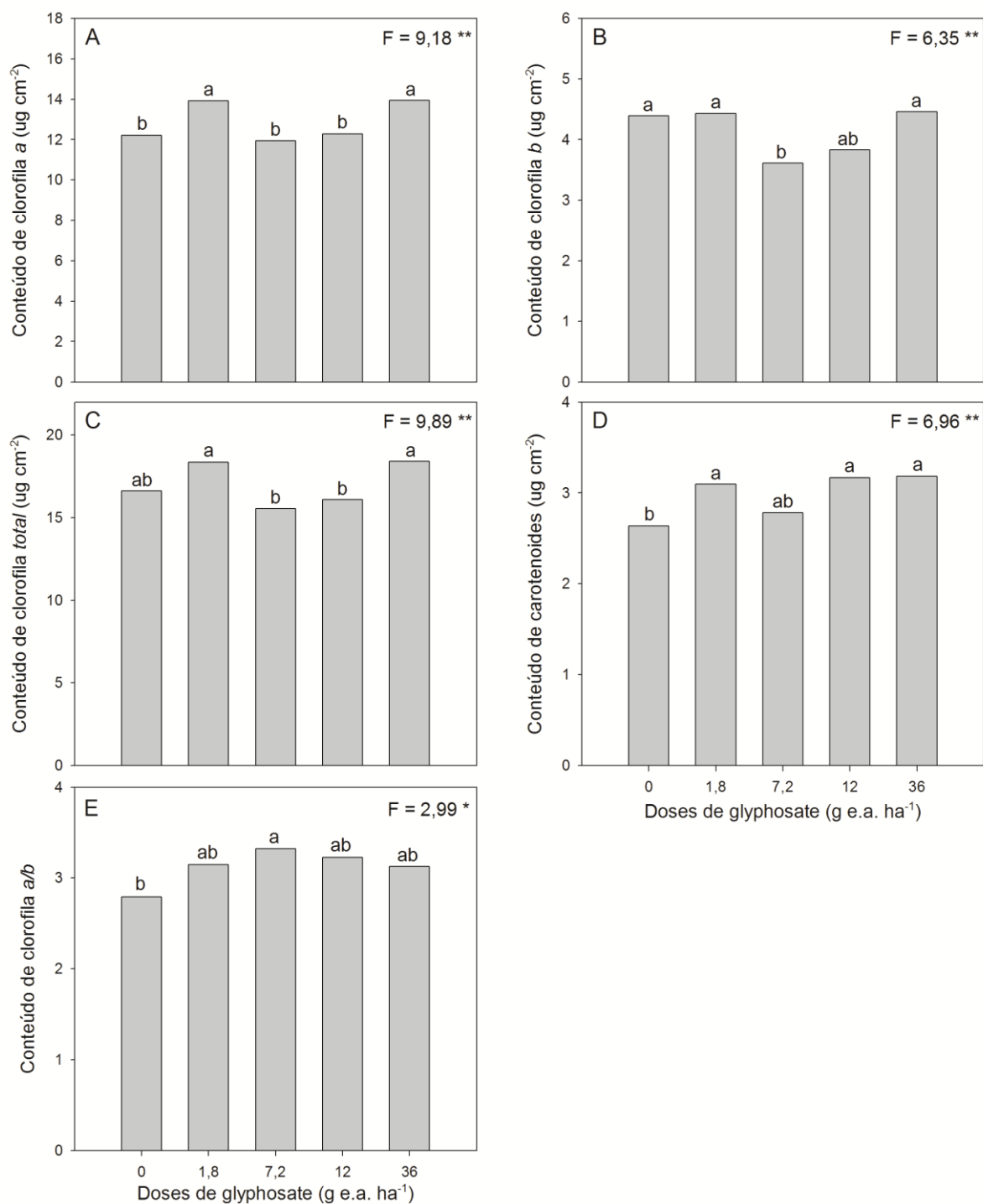
respectivamente, no conteúdo de clorofila *total* (Figura 5C) e de 23 e 42%, respectivamente, no conteúdo de carotenoides (Figura 5D). A relação clorofila *a/b* aumentou em 20% na dose 108 g e.a. ha⁻¹ (Figura 5E).

Figura 2 - Conteúdo de clorofila *a* (A), *b* (B), *total* (C), carotenoides (D) e clorofila *a/b* (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 13 dias após a aplicação na safra de inverno, em Botucatu – SP, 2016.



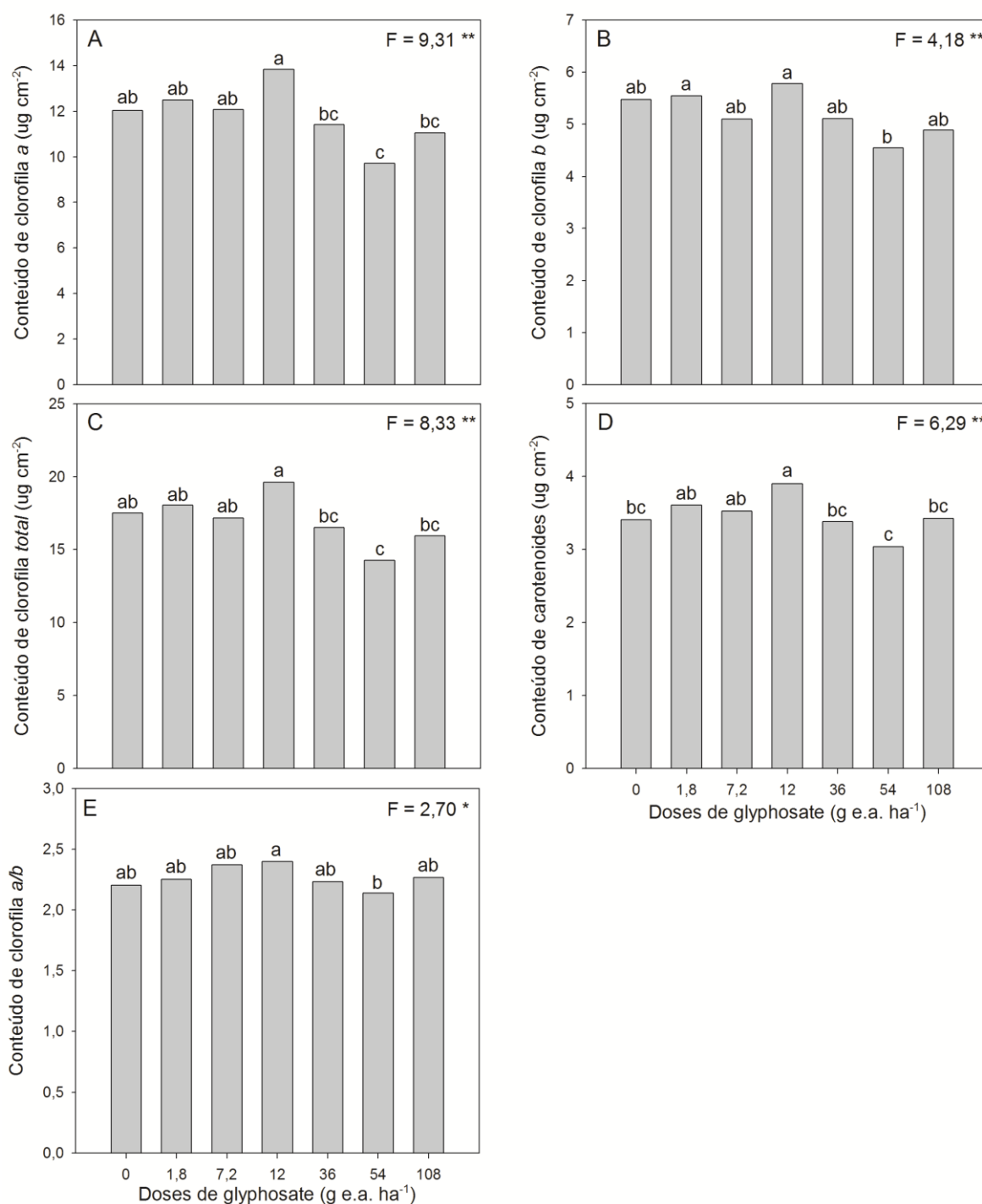
ns: não significativo; * P≤0,05.

Figura 3 - Conteúdo de clorofila *a* (A), *b* (B), *total* (C), carotenoides (D) e clorofila *a/b* (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 21 dias após a aplicação na safra de inverno, em Botucatu – SP, 2016.



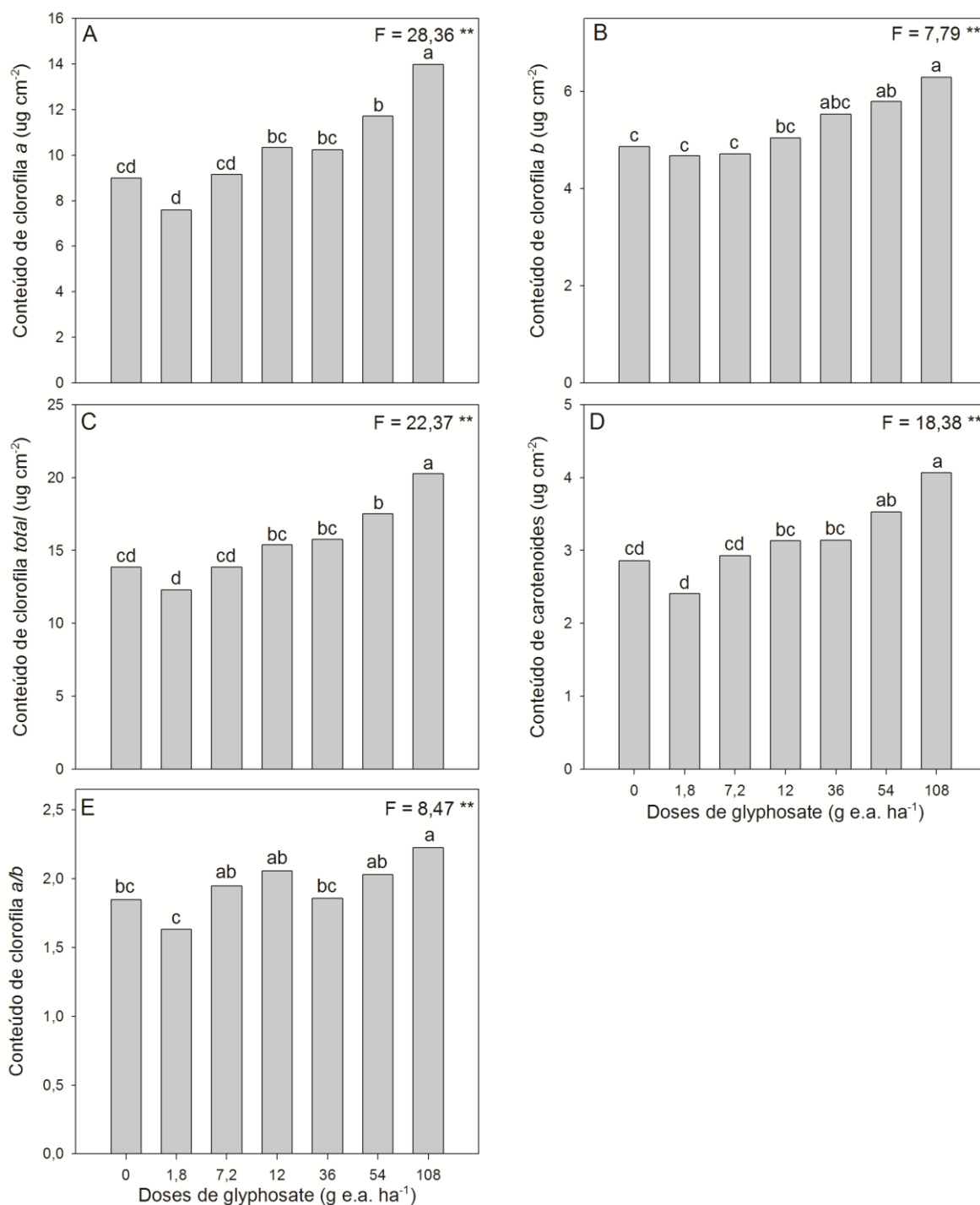
* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$.

Figura 4 - Conteúdo de clorofila *a* (A), *b* (B), *total* (C), carotenoides (D) e clorofila *a/b* (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 10 dias após a aplicação na safra das águas, em Botucatu – SP, 2016.



* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$.

Figura 5 - Conteúdo de clorofila *a* (A), *b* (B), *total* (C), carotenoides (D) e clorofila *a/b* (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 16 dias após a aplicação na safra das águas, em Botucatu – SP, 2016.



** P≤0,01.

3.4.3 Taxa de assimilação de CO₂ (A), condutância estomática (*g_s*), taxa de transpiração (*E*), concentração interna de CO₂ (*C_i*) e Eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*)

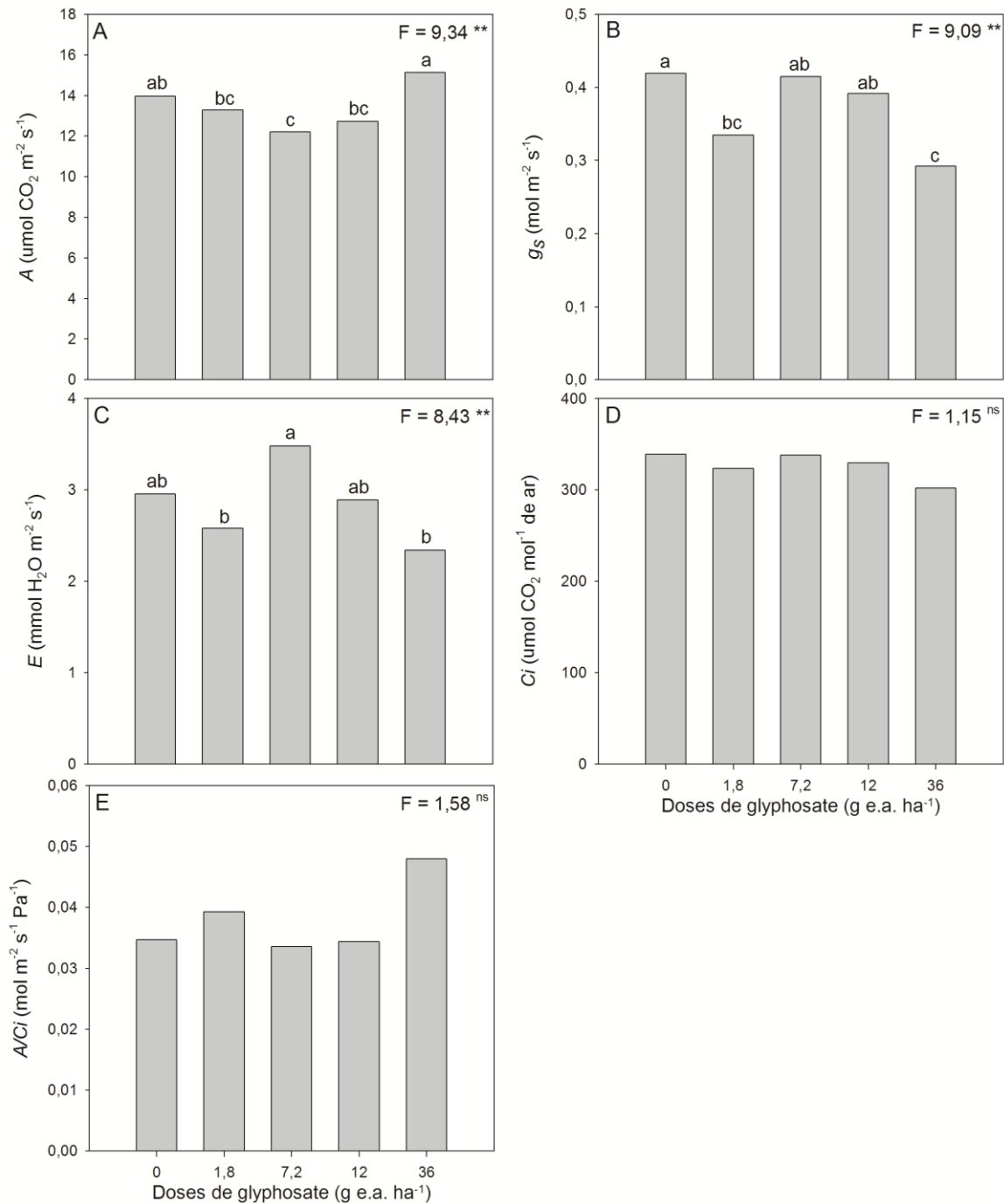
Na safra de inverno, aos 13 DAA houve efeito significativo ($p<0,01$) da aplicação de subdoses de glyphosate na taxa de assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (g_s) e na taxa de transpiração (E), e não houve efeito na concentração interna de CO_2 (C_i) e na eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) (Figura 6). A dose 7,2 g e.a. ha^{-1} proporcionou redução de 13% na A (Figura 6A). Para a g_s foi observado redução de 20 e 30% para as plantas tratadas com as doses 1,8 e 36 g e.a. ha^{-1} , respectivamente (Figura 6B). Para a E , não foi observada diferença significativa em relação à dose 0 g e.a. ha^{-1} (Figura 6C).

Aos 21 DAA não houve efeito significativo da aplicação de subdoses de glyphosate na A , E , C_i e A/C_i , no entanto foi observado efeito significativo ($p<0,01$) na g_s (Figura 7). Foram observados aumentos na g_s nas plantas tratadas com as doses 1,8 e 7,2 g e.a. ha^{-1} , de 21 e 26%, respectivamente (Figura 7B).

Aos 10 DAA na safra das águas foi observado efeito significativo ($p<0,01$) da aplicação de subdoses de glyphosate na taxa de assimilação de CO_2 (A), condutância estomática (g_s), taxa de transpiração (E) e na eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i), enquanto que não foi observado diferença na concentração interna de CO_2 (C_i) (Figura 8). A aplicação da dose 108 g e.a. ha^{-1} proporcionou redução de 112% na A (Figura 8A). Houve reduções nos valores de g_s nas plantas tratadas com as doses 54 e 108 g e.a. ha^{-1} , de 16 e 97%, respectivamente (Figura 8B). A dose 108 g e.a. ha^{-1} reduziu em 94% a E (Figura 8C) e 107% a A/C_i (Figura 8E).

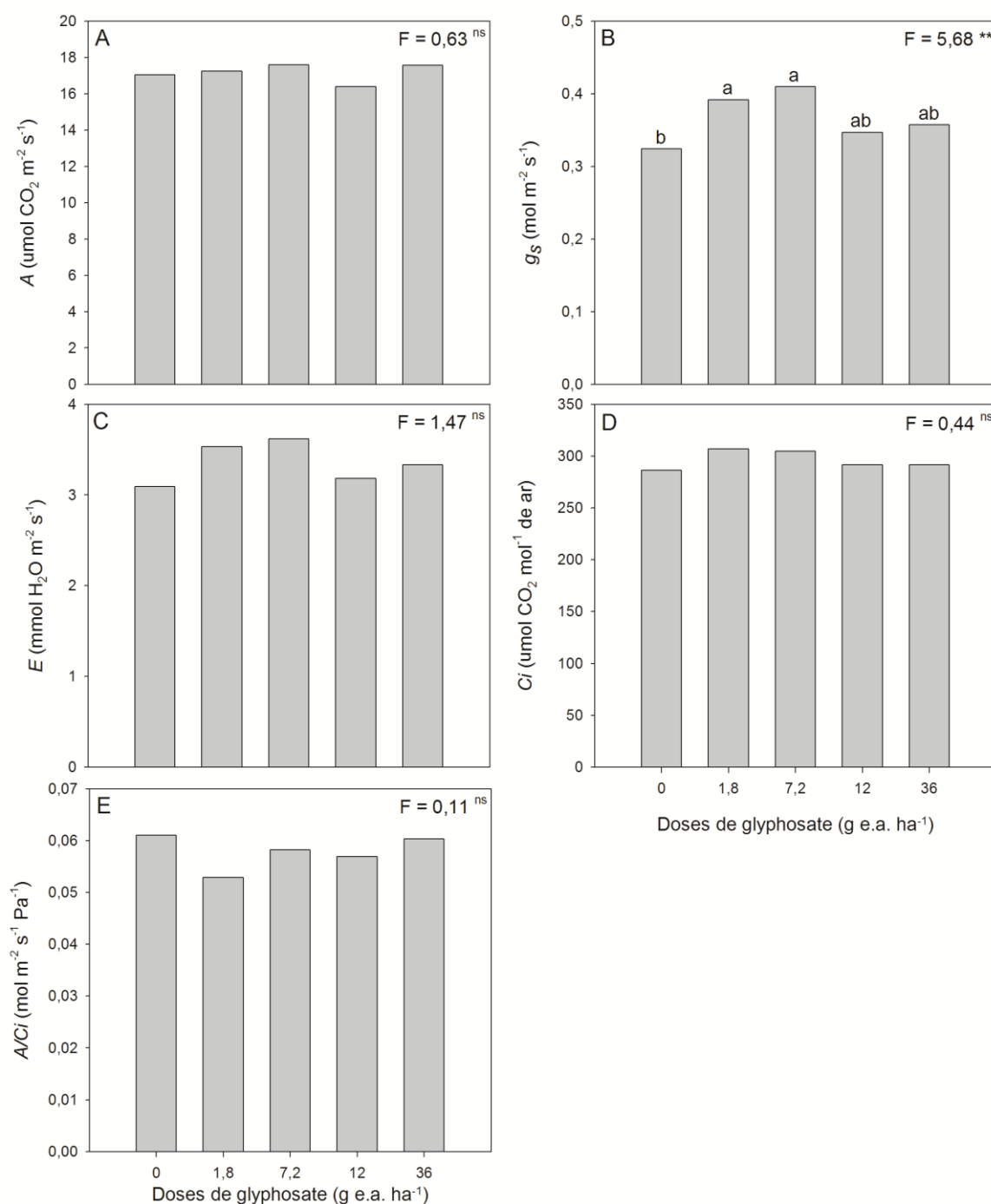
A aplicação de subdoses de glyphosate proporcionou efeito significativo ($p<0,01$) na A , g_s , E e A/C_i das plantas de feijoeiro na safra das águas aos 16 DAA, e não foi observado efeito na C_i (Figura 9). Reduções foram observadas na A , 73% (Figura 9A), na E , 70% (Figura 9C), e na A/C_i , 65% (Figura 9E) com a dose 108 g e.a. ha^{-1} . Para a g_s , a aplicação das doses 54 e 108 g e.a. ha^{-1} proporcionou reduções de 24 e 74%, respectivamente (Figura 9B).

Figura 6 - Taxa de assimilação de CO₂ (A) (A), condutância estomática (g_s) (B), taxa de transpiração (E) (C), concentração interna de CO₂ (Ci) (D) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci) (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 13 dias após a aplicação na safra de inverno, em Botucatu – SP, 2016.



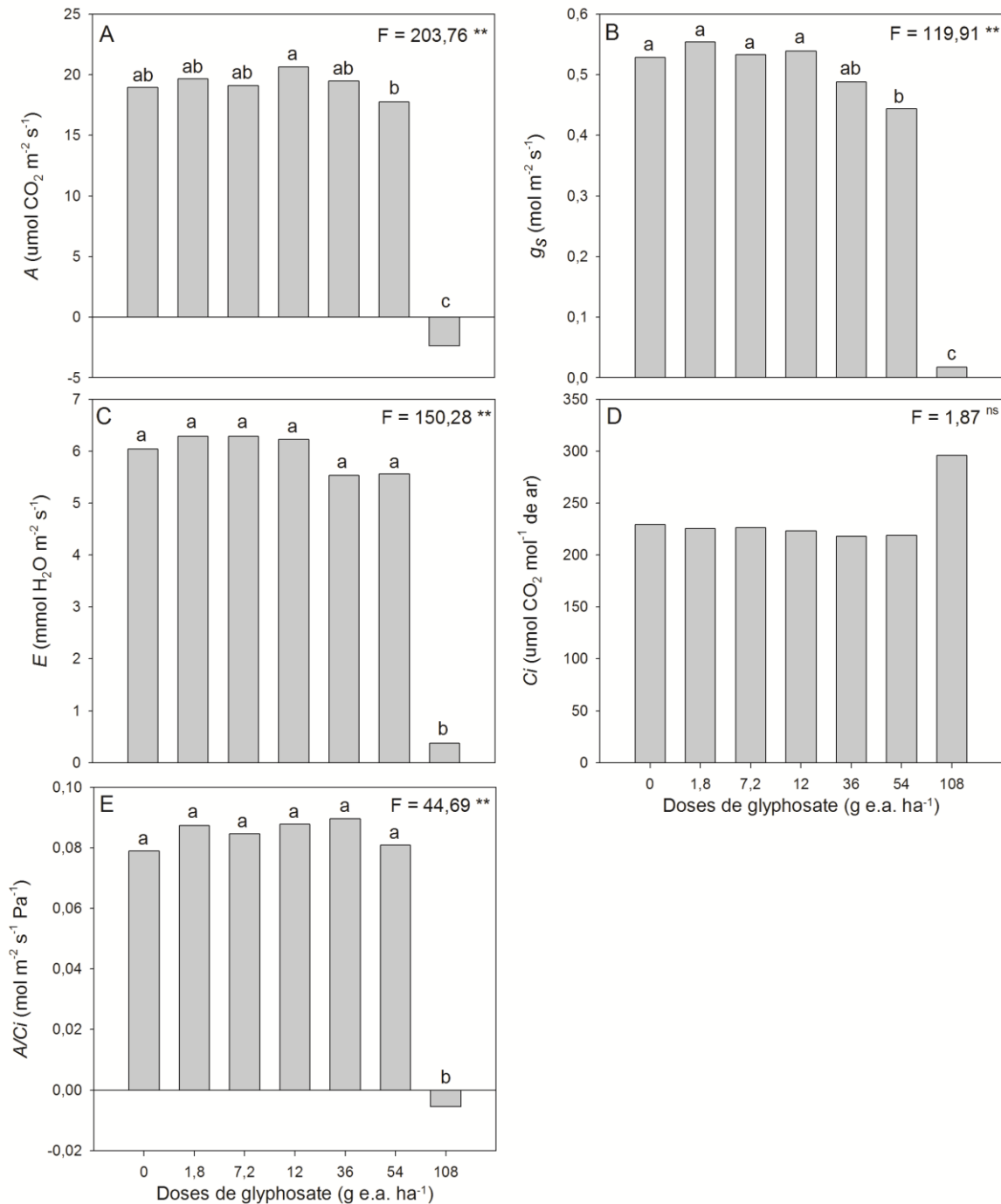
ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

Figura 7 - Taxa de assimilação de CO₂ (A) (A), condutância estomática (g_s) (B), taxa de transpiração (E) (C), concentração interna de CO₂ (Ci) (D) e eficiência de carboxilação da rubisco (A/Ci) (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 21 dias após a aplicação na safra de inverno, em Botucatu – SP, 2016.



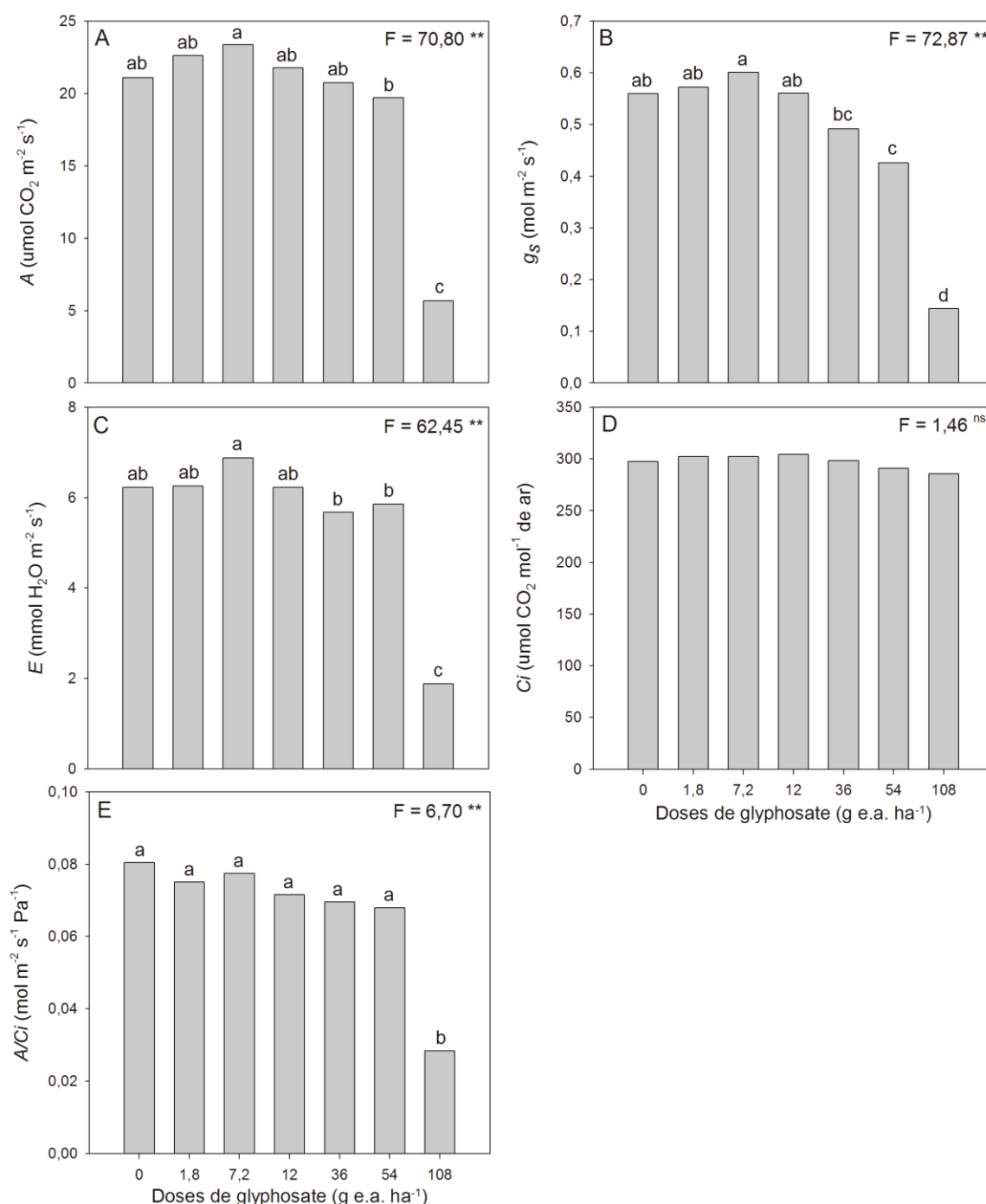
ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

Figura 8 - Taxa de assimilação de CO_2 (A) (A), condutância estomática (g_s) (B), taxa de transpiração (E) (C), concentração interna de CO_2 (C_i) (D) e eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i) (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 10 dias após a aplicação na safra das águas, em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

Figura 9 - Taxa de assimilação de CO_2 (A) (A), condutância estomática (g_s) (B), taxa de transpiração (E) (C), concentração interna de CO_2 (Ci) (D) e eficiência de carboxilação da rubisco (A/Ci) (E) em feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 16 dias após a aplicação na safra das águas, em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** $P \leq 0,01$.

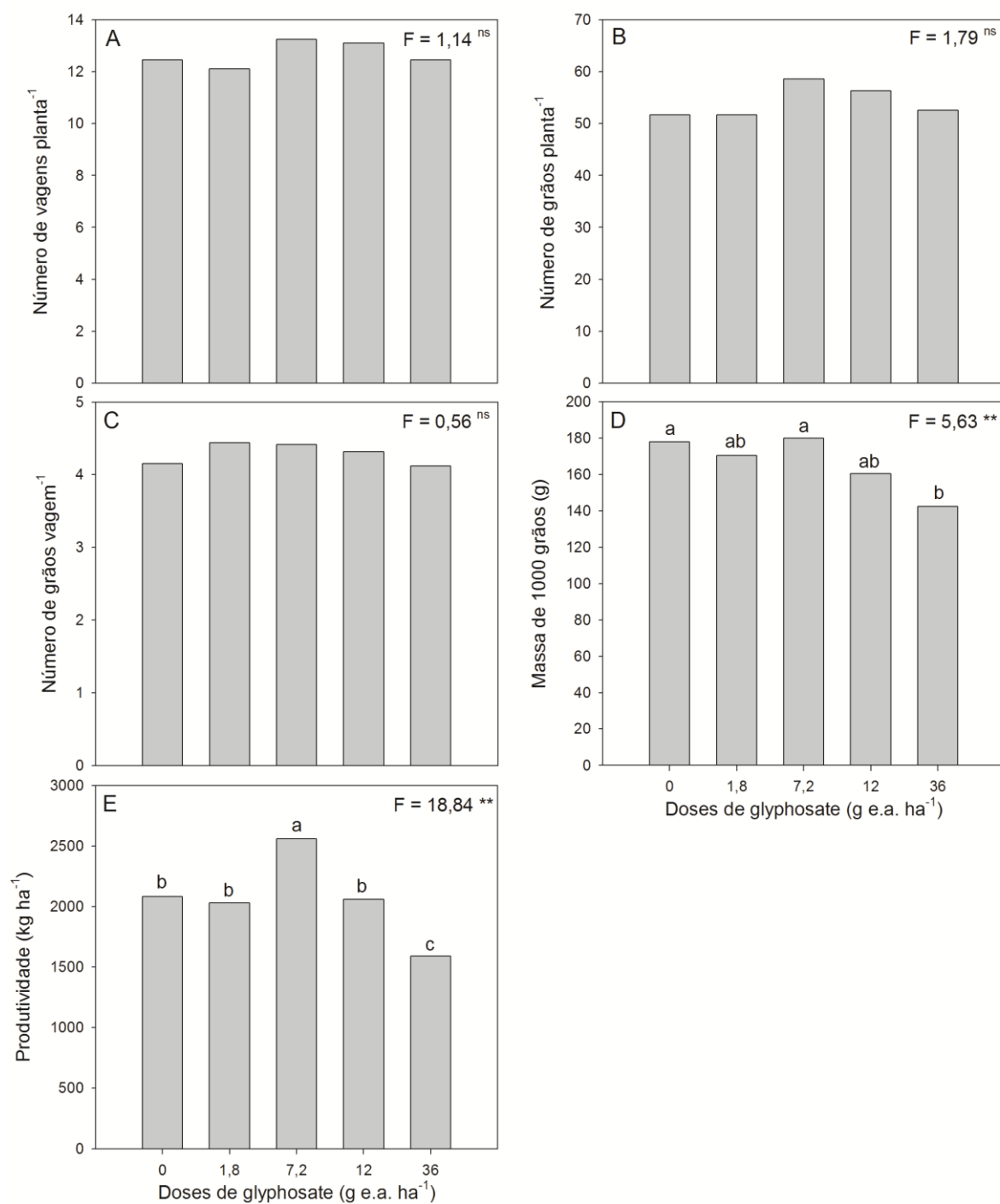
3.4.4 Componentes de produção

Na safra de inverno não foi observado efeito significativo no número de vagens por planta, número de grãos por planta e número de grãos por vagem, enquanto houve efeito significativo ($p < 0,01$) na massa de 1000 grãos e na produtividade

(Figura 10). Para a massa de 1000 grãos houve redução de 20% nas plantas tratadas com a dose 36 g e.a. ha⁻¹ (Figura 10D). Para a produtividade foi observado aumento nas plantas tratadas com a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹, de 23%, enquanto a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou redução de 24% (Figura 10E).

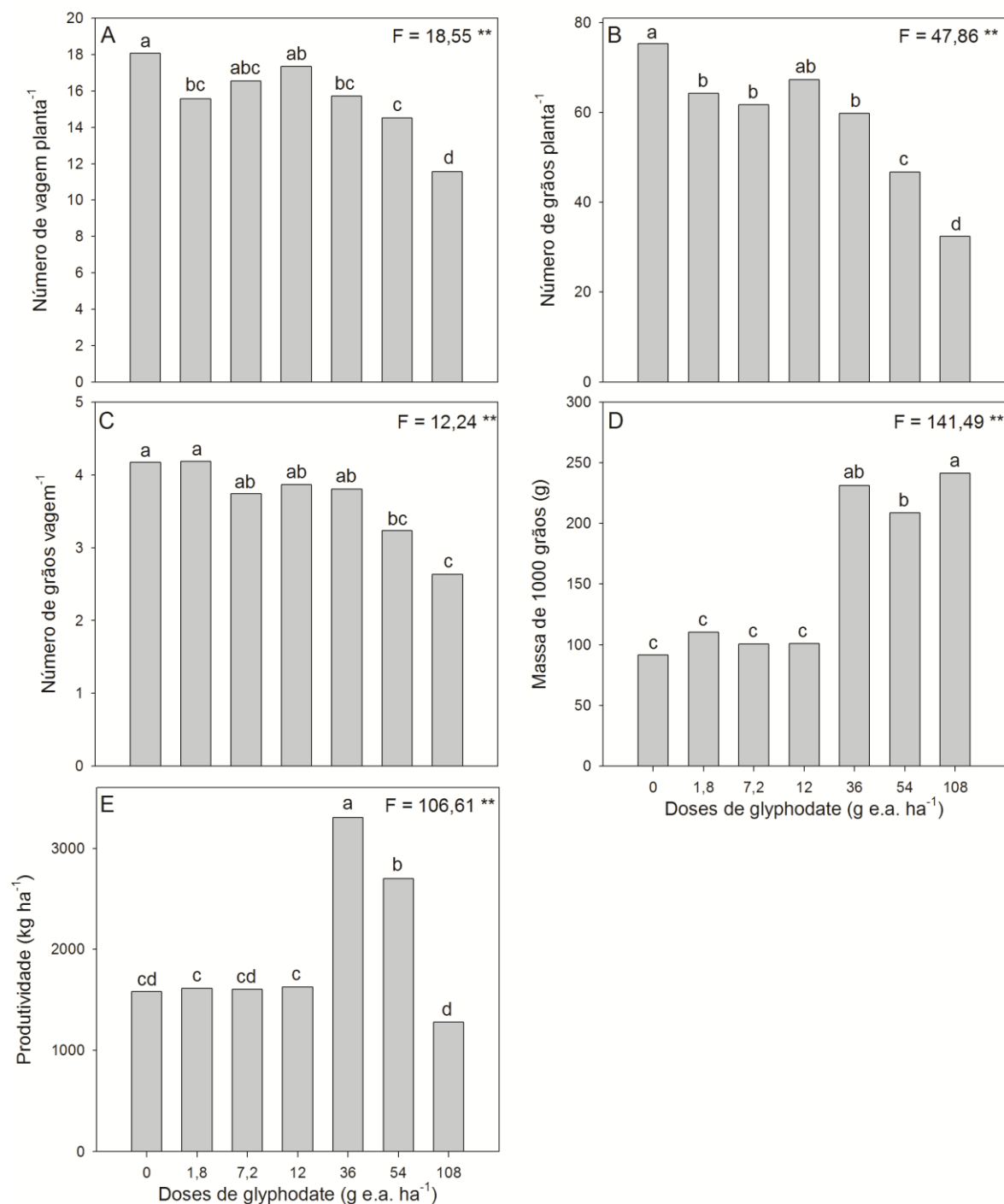
Na safra das águas houve efeito significativo ($p < 0,01$) da aplicação de subdoses de glyphosate no número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem, massa de 1000 grãos e produtividade (Figura 11). O número de vagens por planta foi reduzido sob todas as doses aplicadas, com reduções de 14, 13, 20 e 36% para as doses 1,8; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 11A). O número de grãos por plantas teve reduções de 15, 18, 21, 38 e 57% correspondentes às doses 1,8; 7,2; 36; 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 11B). Foram observadas reduções de 22 e 37% no número de grãos por vagem nas plantas tratadas com as doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 11C). Por outro lado, houve aumento na massa de 1000 grãos com as doses 36, 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, de 152, 128 e 163%, respectivamente (Figura 11D). Em relação à produtividade foram observados aumentos de 109 e 71% nas plantas tratadas com as doses 36 e 54 g e.a. ha⁻¹, respectivamente (Figura 11E).

Figura 10 – Número de vagens planta⁻¹ (A), número de grãos planta⁻¹ (B), número de grãos vagem⁻¹ (C), massa de 1000 grãos (g) (D), produtividade (kg ha⁻¹) (E) de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 68 dias após a aplicação na safra de inverno, em Botucatu – SP, 2016.



ns: não significativo; ** P≤0,01.

Figura 11 - Número de vagens planta⁻¹ (A), número de grãos planta⁻¹ (B), número de grãos vagem⁻¹ (C), massa de 1000 grãos (g) (D), produtividade (kg ha⁻¹) (E) de feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate aos 53 dias após a aplicação na safra das águas, em Botucatu – SP, 2016.



** P≤0,01.

3.5 Discussão

O crescimento e a produtividade do feijoeiro são favorecidos sob temperaturas médias entre 17,5 a 25,0°C, sendo a temperatura mínima para o desenvolvimento do feijoeiro de 10°C e a máxima de 35°C (VIEIRA et al., 2006; PEREIRA et al.,

2014). As temperaturas em ambas as safras variaram numa faixa mais ampla, com temperaturas mais baixas que a mínima e mais altas que a máxima consideradas ideais (Figura 1), tanto que na safra de inverno totalizaram 34 dias com temperaturas abaixo da ideal, enquanto somente nove dias com temperaturas abaixo da ideal na safra das águas. Na safra das águas a temperatura encontrava-se próxima da faixa ideal para a cultura (Figura 1B). Após a aplicação dos tratamentos na safra das águas as temperaturas foram próximas da faixa ideal para a cultura, enquanto na safra de inverno as temperaturas estavam mais baixas.

A radiação solar também é primordial no desenvolvimento do feijoeiro, e na determinação do rendimento (DIDONET, 2010). Na safra de inverno, tem-se menos radiação solar incidente, pelo fato de os dias serem mais curtos, o contrário ocorre na safra das águas, em que os dias são mais longos. As temperaturas ideais promovem o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (DIDONET, 2010), temperaturas mais baixas podem atrasar o desenvolvimento vegetativo do feijoeiro (PEREIRA et al., 2014). No presente trabalho, foi observado prolongamento do ciclo do feijoeiro na safra de inverno (102 DAS), na qual ocorreram temperaturas e comprimento do dia menores, enquanto que na safra das águas, com temperaturas e dias maiores o ciclo foi menor (92 DAS). De fato, segundo Didonet (2010) é esperado que temperaturas mais altas acelerem o ciclo do feijoeiro.

As condições ambientais afetam o efeito de hormese das culturas, assim como, a amplitude do efeito estimulatório. Beltz e Cedergreen (2010), avaliando efeito de hormese em *Lactuca sativa* L. em diferentes condições de temperatura do ambiente, observaram que o ambiente altera significativamente a dose-resposta e a expressão de hormese. Em temperaturas mais baixas (10 - 15°C) não ocorreu hormese ou o efeito de hormese levou mais tempo para ser observado, devido ao lento crescimento das plantas, enquanto em temperaturas mais altas (18 - 24°C e 25 - 30°C) foi observado efeito de hormese.

Beltz (2008) também observou o efeito da temperatura na resposta hormética de *Sinapis arvensis* L. após aplicação da toxina natural partenina, porém, o efeito de hormese foi observado em temperaturas mais baixas (12 - 20°C) e não foi observado em temperaturas mais altas (17 - 29°C). Por outro lado, Cedergreen (2008) observou efeito de hormese na biomassa de cevada no inverno e nenhum efeito no verão, no entanto a produtividade de grãos foi maior no verão, evidenciando a influência do ambiente na variável avaliada.

As clorofilas estão diretamente ligadas com a eficiência fotossintética das plantas, conferindo um importante papel na adaptação das culturas aos diferentes ambientes (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979). Na safra de inverno, aos 13 DAA, foi observada redução no conteúdo de clorofila *b* na dose 12 g e.a. ha⁻¹, apesar de não ocorrer diferença significativa também ocorreu redução na *A* na mesma dose, a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ promoveu redução significativa na *A*, e também ocorreu redução no conteúdo de clorofila *b*, apesar de não significativa (Figura 2 e 6). Aos 21 DAA foi observado aumento no conteúdo de clorofila *a* nas doses 1,8 e 36 g e.a. ha⁻¹, porém não foi observado aumento na *A* (Figura 3 e 7). Na safra das águas, aos 10 DAA houve redução no conteúdo de clorofila *a*, *b* e *total* na dose 54 g e.a. ha⁻¹, apesar de não ocorrer diferença significativa houve redução na *A*, enquanto que, aos 16 DAA, houve aumento no conteúdo de clorofila *a*, *b* e *total* nas doses 54 e 108 g e.a. ha⁻¹, porém não houve aumento na *A* (Figura 4, 5, 8 e 9). Apesar do aumento no conteúdo de clorofilas aos 21 DAA na safra de inverno e aos 16 DAA na safra das águas, não foi observado efeito na *A*, o que pode indicar a influência do ambiente nessas características, ou que o efeito das subdoses de glyphosate foi passageiro.

As clorofilas *a* e *b* ocorrem normalmente na proporção de 3 para 1 (relação clorofila *a/b*) (LICHTENTHALER et al., 1981). Valores menores podem indicar danos ao aparato fotossintético. Estudos têm demonstrado que o estresse causa redução na relação clorofila *a/b* (CASTRO et al., 2005; SILVA et al., 2014). A relação clorofila *a/b* na safra de inverno variou entre 2,92 a 3,62 aos 13 DAA e entre 2,79 e 3,32 aos 21 DAA. Na safra das águas, aos 10 DAA, os valores variaram entre 2,13 a 2,40, enquanto que aos 16 DAA os valores oscilaram entre 1,63 e 2,22, o que pode indicar que na safra das águas as plantas estavam sob estresse. Como na dose 0 g e.a. ha⁻¹ também foram observados valores baixos, o estresse não foi causado pelas subdoses de glyphosate, portanto, pode ter sido causado pelo ambiente.

A clorofila *a* é responsável pelo primeiro estágio do processo fotossintético, a fotoquímica, enquanto a clorofila *b* e os carotenoides são considerados pigmentos acessórios, pois auxiliam na absorção de luz e na transferência da energia para os centros de reação (STREIT et al., 2005). A clorofila *b*, em conjunto com a clorofila *a*, amplifica a faixa de captação de luz da fotossíntese e executa papel importante na transferência da energia captada para as moléculas da cadeia transportadora de elétrons da fotossíntese (RAVEN, 1983). Os carotenoides também têm função de proteção do aparelho fotossintético contra a fotooxidação (STREIT et al., 2005).

Barbosa et al. (2018) observaram alterações no conteúdo de clorofilas e carotenoides de genótipos de soja com a aplicação de doses entre 3,5 e 17,5 g e.a. ha⁻¹, as quais promoveram incrementos no conteúdo de clorofila *a*, *b* e carotenoides. Por outro lado, em cana-de-açúcar foi observado redução no conteúdo de clorofilas e carotenoides após aplicação de glyphosate em doses mais altas (144 g e.a. ha⁻¹), enquanto doses mais baixas não proporcionaram alterações (MESCHEDE et al., 2011). Nascentes et al. (2017) também observaram efeito de hormese da aplicação de subdoses de glyphosate no conteúdo de clorofilas em cana-de-açúcar, porém não observaram efeito em eucalipto.

Foi observado aumento no conteúdo de clorofila *a* em algas (*Microcystis aeruginosa*) submetidas à subdoses de glyphosate (QIU et al., 2013). O aumento no conteúdo de clorofila *a* pode indicar que a cultura passou por um período de estresse, e posteriormente ao estresse ocorre o aumento no conteúdo de clorofila com a finalidade de aumentar ou manter a produção de energia (NIELSON; DAHLLOF, 2007).

Por outro lado, Aldesuquy e Ibrahin (2000) afirmaram que a aplicação de subdoses de ácido chiquímico em plantas de feijoeiro caupi (*Vigna sinensis*) promoveu o incremento do conteúdo de clorofila *a*, *b*, carotenoides, *g_s*, *E* e *A*, indicando ser resultado de o ácido chiquímico aumentar a biossíntese de compostos fenólicos, estimulando os pigmentos fotossintéticos. Foi observado alto conteúdo de ácido chiquímico em plantas de feijoeiro caupi após aplicação de subdoses de glyphosate (REDDY et al., 2008).

A fotossíntese não é o primeiro alvo da inibição do herbicida glyphosate, apesar de ser afetada. Após a aplicação, o desvio de carbono que ocorre na rota do ácido chiquímico causa redução na ribulose bifosfato (RuBP), seguido por redução na taxa de assimilação de CO₂ e aumento na condutância estomática. O que pode indicar que o efeito na fotossíntese pela aplicação do glyphosate é indireto, devido aos efeitos secundários do herbicida (MADSEN et al., 1995).

Olesen e Cedergreen (2010) observaram redução na *A* e *g_s* em plantas de cevada e Geiger et al. (1987) em folhas de beterraba após aplicação de subdoses de glyphosate. Aparentemente estas reduções estão ligadas à redução na regeneração da rubisco e não são efeitos da redução da condutância estomática. De acordo com nossos resultados, houve redução na *A*, *g_s*, *E* e *A/Ci* na dose 108 g e.a. ha⁻¹ na safra das águas.

Carvalho et al. (2013) observaram redução na A e no consumo de CO_2 após 15 dias da aplicação de subdoses de glyphosate em café, no entanto aos 45 DAA não foi observada diferença na A , porém o consumo de CO_2 continuou menor em relação ao tratamento controle, indicando que a redução na A está relacionada a limitações metabólicas da planta ou restrição de CO_2 . No entanto, avaliando a aplicação de subdoses de glyphosate em *Commelina benghalensis* e *Bidens pilosa* foi observada redução nos valores de A aos 20 DAA conforme o aumento das doses aplicadas, no entanto aos 30 DAA houve aumento na A e g_s com o aumento das doses do herbicida, enquanto para a E não foi observada alteração (SILVA et al., 2015).

Por outro lado, pode ocorrer aumento na taxa de assimilação de CO_2 devido ao aumento na eficiência de fixação de CO_2 , redução da fotorrespiração e aumento da eficiência no uso da luz na fotossíntese (SHARKEY et al., 2007). A eficiência de fixação de CO_2 pode aumentar através de aumento na condutância nos estômatos e no mesofilo (CEDERGREEN; OLESEN, 2010).

Cedergreen e Olesen (2010) observaram aumento da taxa de assimilação de CO_2 em cevada submetida à subdoses de glyphosate, na dose de 22 g e.a. ha^{-1} , mas sem efeito na condutância estomática. As alterações foram observadas pelos autores a partir do primeiro dia após a aplicação e se estenderam até o sétimo dia, e atribuíram esses efeitos ao aumento da atividade da rubisco, à regeneração mais eficiente da rubisco ou ao aumento na taxa de uso de ATP pelas plantas tratadas com subdoses de glyphosate. De acordo com nossos resultados, apesar de não ter ocorrido diferença significativa, houve aumento na A na safra de inverno aos 13 DAA na dose 36 g e.a. ha^{-1} , que pode ser explicada pelo aumento na A/C_i (Figura 6).

Segundo Silva et al. (2015), a aplicação de herbicidas inibidores de EPSPs tende reduzir a taxa de transpiração, devido ao bloqueio na síntese de aminoácidos essenciais. A transpiração está intimamente relacionada à abertura e fechamento estomático, pois a condutância estomática é responsável pela entrada e saída de água e CO_2 através dos estômatos, e quanto menor a abertura dos estômatos, maior é a resistência, ocorrendo redução na transpiração (TAIZ et al., 2017).

O aumento na taxa de transpiração é benéfico, pois está relacionado com a taxa de assimilação de CO_2 , e a redução na taxa de transpiração após aplicação do herbicida reforça o estresse causado pela aplicação, com consequente desbalanço metabólico na cultura (MACHADO et al., 2010). Na safra das águas houve redução na g_s e E nas doses mais altas aos 10 e 16 DAA, redução no conteúdo de clorofilas

nas doses mais altas aos 10 DAA e aumento no conteúdo de clorofilas nas doses mais altas aos 16 DAA, indicando que as doses mais altas causam estresse no feijoeiro (Figura 4, 5, 8 e 9).

Em cana-de-açúcar e eucalipto foi observado efeito de hormese da aplicação de subdoses de glyphosate na A , g_s e E após 15 DAA, com incremento de 99,4% na A com a dose de 6,1 g e.a. ha^{-1} para a cana-de-açúcar e 98,6% de incremento para o eucalipto com a dose de 11,6 g e.a. ha^{-1} . Na condutância estomática das plantas de cana-de-açúcar e eucalipto foi observado aumento de 82,7%, nas doses de 3,4 e 11,4 g e.a. ha^{-1} , respectivamente. A taxa de transpiração na cana-de-açúcar teve aumento de 80,6% na dose de 3,4 g e.a. ha^{-1} , enquanto para o eucalipto houve aumento de 86,1%, na dose de 11,2 g e.a. ha^{-1} (NASCENTES et al., 2017). Por outro lado, Machado et al. (2010) observaram incremento na A , g_s e E de eucalipto após 21 dias da aplicação da dose de 43,2 g ha^{-1} de glyphosate, com queda nos valores com a dose mais alta, 172,8 g ha^{-1} .

A aplicação de subdoses de glyphosate não proporcionou efeito significativo no número de vagens por planta, número de grãos por planta, e número de grãos por vagem na safra de inverno, porém foram observados efeitos significativos na massa de 1000 grãos, com redução com a dose 36 g e.a. ha^{-1} , e na produtividade de grãos, com incremento nas plantas tratadas com a dose 7,2 g e.a. ha^{-1} , e redução na dose mais alta (36 g e.a. ha^{-1}), esta redução é explicada pela redução na massa dos grãos (Figura 10).

Na safra das águas foi observada redução no número de vagens por planta, número de grãos por planta e número de grãos por vagem com o aumento da subdose aplicada, no entanto, ocorreu aumento na massa de 1000 grãos conforme o aumento da subdose, que pode ter ocorrido devido a redução no número de grãos, e aumento na produtividade de grãos nas plantas tratadas com as doses 36 e 54 g e.a. ha^{-1} , portanto, indicando que o aumento na produtividade pode ser devido ao aumento no peso dos grãos, e a redução na produtividade na maior dose, provavelmente, é explicada pela redução no número de vagens por planta, no número de grãos por planta e no número de grãos por vagem (Figura 11).

Silva et al. (2012) não observaram influência da aplicação de subdoses de glyphosate na produtividade do feijoeiro, cultivar Carioca, cultivado na safra de inverno, com decréscimo na massa de 100 grãos conforme o aumento das doses aplicadas. Por outro lado, Silva et al. (2016) verificaram incremento na produtividade

do feijoeiro de inverno após aplicação de subdoses de glyphosate no estágio V₄ e aplicações parceladas em V₄₋₄ e em V₄₋₇ com aplicação da dose de 12 g e.a. ha⁻¹, mas não verificaram diferença na massa de 1000 grãos e número de grãos por planta em nenhuma dose aplicada, as diferenças nos resultados em relação ao presente estudo podem ocorrer devido às condições climáticas, Silva et al. (2016) obteve temperatura média de 25°C, maiores que a obtida no presente estudo na safra de inverno (19,2°C). Em arroz de terras altas, Gitti et al. (2011) observaram aumento no número de grãos por panícula após aplicação de subdoses de glyphosate (11,6 – 32,0 g e.a. ha⁻¹), porém sem aumento na produtividade.

A aplicação de glyphosate em determinado estágio de desenvolvimento da cultura pode direcionar o carbono assimilado para estruturas vegetativas ou reprodutivas, assim como é observado na cana-de-açúcar, em que baixas doses de glyphosate inibiram a síntese de lignina, redirecionando o carbono para a produção de sacarose (GITTI et al., 2011). Conforme avançam os estádios fenológicos do vegetal, ele estabelece prioridades, direcionando os seus metabólitos para os locais de maiores demandas, portanto, quanto mais próximos ao máximo desenvolvimento vegetativo e ao início da diferenciação floral melhor serão observados os resultados do efeito de hormese (SILVA et al., 2016).

Alterações significativas no ambiente do organismo são prejudiciais para o seu normal funcionamento biológico, no entanto, essas alterações podem ser prevenidas pelos sistemas regulatórios. Portanto, assim que o organismo é capaz de normalizar o seu funcionamento, as mudanças serão moderadas (EROFEEVA, 2014). De acordo com Calabrese e Baldwin (2002), o efeito de hormese pode ocorrer de acordo com duas respostas biológicas, uma é a estimulação direta da característica, isto é, uma resposta adaptativa que ocorre através de um mecanismo positivo, sem alterações no normal funcionamento do organismo, e a outra é um efeito compensatório causado por um rompimento do funcionamento normal do organismo, sendo esta resposta adaptativa em função de um pequeno estresse ou dano que resulta em aprimoramento do organismo, este efeito pode ser passageiro. No presente trabalho pode ter ocorrido uma resposta adaptativa em função de pequeno estresse, pois não foi observado efeito estimulatório na fisiologia do feijoeiro, porém houve aumento de produtividade.

Cedergreen et al. (2009) observaram aumento de 12% na produtividade de grãos de cevada com aplicação de glyphosate nas doses de 2,5 a 20 g e.a. ha⁻¹ na

fase de enchimento de grãos. Outros componentes da produtividade, como peso de 1000 grãos, não foram afetados, indicando que o mecanismo de hormese não afetou a assimilação de CO_2 , no entanto, foi mais eficiente na translocação dos fotossintetizantes ao grão. O mesmo pode ter ocorrido no presente estudo, no qual, na safra de inverno não houve efeito positivo na taxa de assimilação de CO_2 aos 13 e 21 DAA, sendo observada redução na A na dose 7,2 g e.a. ha^{-1} , entretanto com aumento de produtividade de grãos, e na safra das águas, também não foi observado estímulo na A , porém houve incremento na produtividade de grãos. As subdoses de glyphosate podem causar estresse na cultura, e, consequentemente, ocorre um redirecionamento do carbono para os órgãos reprodutivos (CEDERGREEN et al., 2008).

Na safra de inverno, devido às temperaturas mais baixas (10,6 – 26,5°C), e consequentemente a um metabolismo mais lento, as plantas levaram mais tempo para se desenvolver e completar o ciclo (68 DAA), portanto doses menores (7,2 g e.a. ha^{-1}) foram suficientes para promover alterações na produtividade. Enquanto na safra das águas as plantas completaram o ciclo mais rapidamente (53 DAA), pois temperaturas mais altas (9,5 – 35,2°C) levam a um metabolismo mais acelerado, portanto, as alterações na produtividade foram observadas em doses maiores (36 g e.a. ha^{-1}).

3.6 Conclusão

Na safra de inverno as subdoses de glyphosate entre 1,8 e 36 g e.a. ha^{-1} proporcionaram estímulo no conteúdo de clorofila a , b , carotenoides e g_s , não foi observado efeito para a A , E , A/Ci e Ci .

Na safra das águas as subdoses de glyphosate entre 1,8 e 36 g e.a. ha^{-1} não alteraram o conteúdo de clorofilas, carotenoides, A , g_s , E , A/Ci e Ci do feijoeiro, e as doses 54 e 108 g e.a. ha^{-1} proporcionaram incremento no conteúdo de clorofilas e carotenoides.

A dose 108 g e.a. ha^{-1} foi prejudicial para a A , g_s , E , A/Ci , número de vagens por planta, número de grãos por planta e número de grãos por vagem do feijoeiro de ciclo precoce.

Na safra de inverno a dose 7,2 g e.a. ha^{-1} de glyphosate promoveu aumento de produtividade de grãos. Na safra das águas a dose 36 g e.a. ha^{-1} promoveu aumento na produtividade de grãos.

REFERÊNCIAS

- ALDESUQUY, H.S., IBRAHIN A.H.A. The role of shikimic acid in regulation of growth, transpiration, pigmentation, photosynthetic activity and productivity of *Vigna sinensis* plants. **Phyton**, v. 40, n. 2, p. 277-292, 2000.
- AMBROSANO, E.J. et al. **Feijão**. In: RAIJ, B. van, CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 194-195. (Boletim Técnico, 100).
- BARBOSA, A.P. et al. Subdoses de glyphosate no desempenho fitométrico e bioquímico de soja convencional e transgênica. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 36-42, 2018.
- BELZ, R.G. Stimulation versus inhibition – bioactivity of parthenin, a phytochemical from *Parthenium hysterophorus* L. **Dose-Response**, v. 6, n. 1, p. 80-96, 2008.
- BELTZ, R.G., CEDERGREEN, N. Parthenin hormesis in plants depends on growth conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 1, p. 293-301, 2010.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 2009. 395p.
- CALABRESE, E.J.; BALDWIN, L.A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 1, p. 91-97, 2002.
- CARVALHO, F.P.; ALVES, P.L.C.A.; DUKE, S.O. Photosynthetic activity of coffee after application of glyphosate subdoses. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 1, p. 109-115, 2013.
- CASTRO, E.M. et al. Aspectos anatômicos e fisiológicos de plantas de guaco submetidas à diferentes fotoperíodos. **Horticultura Brasileira**, v. 23, n. 3, p. 846-850, 2005.
- CEDERGREEN N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time? **Environmental Pollution**, v. 156, n. 1, p. 1099–1104, 2008.
- CEDERGREEN, N. et al. Chemical stress can increase crop yield. **Field Crops Research**, v. 114, n. 1, p. 54-57, 2009.
- CEDERGREEN, N.; OLESEN, C.F. Can glyphosate stimulate photosynthesis? **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 96, n. 3, p. 140-148, 2010.
- CONAB. **A cultura do feijão**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes> > Acesso em: 02/08/2018.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: décimo segundo levantamento – setembro 2018. Brasília: Conab, v. 5, n. 12 148p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 11/01/2019.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: quarto levantamento – janeiro 2019. Brasília: Conab, v. 6, n. 4, 126p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 11/01/2019.

DIDONET, D.A. Importância do período pré-floração na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 505-512, 2010.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.^a ed. Rio de Janeiro, 2013, 353p.

EROFEEVA, E.A. Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.). Parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. **Dose-Response**, v. 12, n. 1, p. 121-135, 2014.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Production 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 10/01/2019.

GEIGER, D.R.; TUCCI, M.A.; SERVIATES, J.C. Glyphosate effects on carbon assimilation and gas exchange in sugar beet leaves. **Plant Physiology**, v. 85, n. 1, p. 365-369, 1987.

GITTI, D.C. et al. Glyphosate como regulador de crescimento em arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 500-507, 2011.

HOEKSTRA, J.A.; VAN EWIJK, P.H. Alternatives for the no-observed-effect level. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 12, n. 1, p. 187-194, 1993.

IAC. **Cultivares de feijoeiro IAC**. São Paulo: Instituto Agrônomo, 2018. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/graos/feijao.php>> Acesso em: 25/04/2018.

KRAMER, T.; KOZLOWSKI, T. **Physiology of woody plants**. New York: Academic Press, p. 811, 1979.

LICHTENTHALER, H. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembrans. **Methods in Enzymology**, v.148, n. 1, p. 350-382, 1987.

LICHTENTHALER, H.K. et al. Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure and leaf characteristics of high light and low light plants and of sun and shade leaves. **Photosynthesis Research**, v. 2, n. 1, p. 115, 1981.

MACHADO, A.F.L. et al. Eficiência fotossintética e uso da água em plantas de eucalipto pulverizadas com glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 2, p. 319- 327, 2010.

MADSEN, K.H. et al. Photosynthetic parameters in glyphosate-treated sugar-beet (*Beta vulgaris* L.). **Weed Research**, v. 32, n. 1, p. 81-88, 1995.

MESCHEDE, D.K. et al. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de Glyphosate e Sulfometuron-Methyl. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 413-419, 2011.

NASCENTES R.F. et al. Glyphosate hormesis in *Brachiaria brizanta* cv. Marandu. **Revista do Centro Universitário de Patos de Minas**, v. 6, n. 1, p. 55-64, 2015.

NASCENTES, R.F. et al. Low doses of glyphosate enhance growth, CO₂ assimilation, stomatal conductance and transpiration in sugarcane and eucalyptus. **Pest Management Science**, v. 74, n. 1, p. 1197-1205, 2017.

NIELSON, L.W., DAHLLOF, I. Direct and indirect effects of the herbicides Glyphosate, Bentazone and MCPA on eelgrass (*Zostera marina*). **Aquatic Toxicology**, v. 82, n. 1, p. 47-54, 2007.

OLESEN, C.F.; CEDERGREEN, N. Glyphosate uncouples gas exchange and chlorophyll fluorescence. **Pest Management Science**, v. 66, n. 5, p. 536-542, 2010.

PEREIRA, V.G.C. et al. Exigências agroclimáticas para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 32-42, 2014.

QIU, H. et al. Physiological and biochemical responses of *Microcystis aeruginosa* to glyphosate and its Roundup® formulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 248, n. 1, p. 172-176, 2013.

RAVEN, J.A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, n. 1, p. 179-207, 1983.

REDDY, K.N. et al. Aminomethylphosphonic acid accumulation in plant species treated with glyphosate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 6, p. 2125-2130, 2008.

SILVA, J.C. et al. Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 3, p. 295-302, 2012.

SILVA, J.C. et al. Influência de doses reduzidas e épocas de aplicação sobre o efeito hormético de glyphosate em feijoeiro. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 115, n. 2, p. 191-199, 2016.

SILVA, M.A.; CARLIN, S.D.; CAPUTO, M.M. Tipos de colheita e épocas de aplicação de glifosate na erradicação de soqueiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 1, p. 43-49, 2006.

SILVA, M.A. et al. Efeito hormético de glifosate no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009.

SILVA, M.A. et al. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade de estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, p. 173-181, 2014.

SILVA, R.A. et al. Desenvolvimento de picão preto (*Bidens pilosa*) em resposta à aplicação de subdoses de glyphosate. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 7, n. 1, p. 63-69, 2014.

SILVA, R.A. et al. Interferência de subdoses de glyphosate nas trocas gasosas em picão-preto e trapoeraba. **Global Science and Technology**, v. 08, n. 1, p. 31-39, 2015.

SHARKEY, T.D. et al. Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C-3 leaves. **Plant Cell Environment**, v. 30, n. 9, p. 1035-1040, 2007.

STREIT, N.M. et al. As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6a ed. Artmed, 2017, 858p.

TAVARES, L.A.F. et al. Hormesis method for increasing oat straw with a view to viability of direct seeding systems. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 48-53, 2015.

VALE, N.M. et al. Escolha de genitores quanto à precocidade e produtividade de feijão tipo carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 141-148, 2015.

VELINI, E.D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

VIEIRA, C.; JÚNIOR, T.J.P.; BORÉM, A. **Feijão**. 2 ed. Viçosa: UFV -Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As subdoses de glyphosate causam alterações nas características morfológicas, fisiológicas, nutricionais e de produtividade do feijoeiro de ciclo precoce.

As condições ambientais, como a temperatura do ar, interferem na resposta do feijoeiro de ciclo precoce e na intensidade do efeito das subdoses de glyphosate. Na safra de inverno, com temperaturas entre 10,6 a 26,5°C foi observado efeito das subdoses de glyphosate a partir de cinco dias após a aplicação dos tratamentos no crescimento e índices fisiológicos do feijoeiro. Na safra das águas, com temperaturas entre 9,5 a 35,2°C houve efeito das subdoses de glyphosate no crescimento do feijoeiro e em índices fisiológicos, tais como TCC, TCR e TAL, a partir de cinco dias, enquanto, RAF, AFE a partir de 12 DAA e PEF a partir de 19 DAA.

Quanto à intensidade do efeito, na safra de inverno, o estímulo na produtividade de grãos foi menor em relação à safra das águas, com 24% de incremento na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ na safra de inverno e 109% na safra das águas na dose 36 g e.a. ha⁻¹. As temperaturas mais baixas observadas na safra de inverno atrasaram o desenvolvimento e o ciclo do feijoeiro, causando redução na intensidade do efeito estimulatório. Na safra das águas, o maior efeito na produtividade pode ser devido ao estímulo no crescimento do feijoeiro, também observado na dose 36 g e.a. ha⁻¹, e não observado na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ na safra de inverno.

Na safra de inverno, a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumento na razão de área foliar, no teor de Ca, Mg e Cu na folha, na relação clorofila a/b, na taxa de transpiração, condutância estomática e produtividade de grãos. Não houve alteração, em relação ao tratamento controle, na altura de plantas, área foliar, área foliar específica, peso específico da folha, no conteúdo de clorofila *a*, *total* e carotenoides. Houve redução na massa de matéria seca de folhas, caule e parte aérea, taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida e no conteúdo de clorofila *b*.

Na safra de inverno, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumento na área foliar, massa de matéria seca de folhas, do caule e da parte aérea, razão de área foliar, no teor de P, Ca e Cu na folha, no conteúdo de clorofila *a* e carotenoides. Não houve alterações na taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida, área foliar específica, peso específico da folha, e houve redução na taxa de crescimento da

cultura, no teor de Mn e Fe na folha, no teor de Ca, Mg e S no grão, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos. Apesar do estímulo no crescimento das plantas, este não foi observado na produtividade de grãos do feijoeiro de ciclo precoce para a safra de inverno.

Na safra das águas, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou aumento na massa de matéria seca de folhas, do caule e da parte aérea, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida e peso específico da folha, porém reduziu o teor de macro e micronutrientes na folha, nos grãos houve aumento no teor de Cu, Mn e Fe. Não houve alterações, em relação ao tratamento controle, no conteúdo de clorofilas, carotenoides, taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática, taxa de transpiração, concentração interna de CO₂ e eficiência instantânea de carboxilação da rubisco. Houve redução no número de vagens por planta, número de grãos por planta, aumento na massa de 1000 grãos e aumento de produtividade de grãos.

Na safra de inverno a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹, apesar de não estimular o crescimento do feijoeiro de ciclo precoce, proporcionou estímulo na produtividade de grãos. Na safra das águas a dose 36 g e.a. ha⁻¹ proporcionou estímulo no crescimento do feijoeiro e na produtividade de grãos.

De acordo com os resultados, para a aplicação no estágio vegetativo V₄, na safra de inverno, a dose 7,2 g e.a. ha⁻¹ é indicada para incrementar a produtividade de grãos do feijoeiro de ciclo precoce. Na safra das águas, a dose 36 g e.a. ha⁻¹ é indicada para incrementar a produtividade de grãos do feijoeiro de ciclo precoce. São necessários mais estudos para a definição da melhor dose para a aplicação em diversos ambientes e para o conhecimento do mecanismo que explique como ocorre o efeito estimulatório.

Assim, a aplicação de subdoses de glyphosate pode ser uma técnica de manejo viável ao produtor de feijão, devido ao efeito estimulatório verificado no crescimento e aumento de produtividade de grãos do feijoeiro de ciclo precoce.

REFERÊNCIAS

- BELTZ, R.G.; CEDERGREEN, N. Parthenin hormesis in plants depends on growth conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 1, p. 293-301, 2010.
- BELZ, R.; CEDERGREEN, N.; DUKE, S. O. Herbicide hormesis - can it be useful in crop production? **Weed Research**, v. 5, n. 4, 321-332, 2011.
- BRITO, I. P. F. S. et al. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 73, n. 1, p.1-7, 2017.
- BURATTO, J.S. et al. Adaptabilidade e estabilidade produtiva em genótipos precoces de feijão no estado do Paraná. **Ciências agrárias**, v. 28, n. 3, p. 373-380, 2007.
- CALABRESE, E.J. Historical foundations of hormesis. **Homeopathy**, v. 104, n. 1, p. 83-89, 2015.
- CALABRESE, E.J.; BALDWIN, L.A. Hormesis as a biological hypothesis. **Environmental Health Perspectives**, v. 109, n. 1, p. 357-362, 1998.
- CALABRESE, E.J.; BALDWIN, L.A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 1, p. 91-97, 2002.
- CARVALHO, L.B.; ALVES, P.L.C.A.; DUKE, S.O. Hormesis with glyphosate depends on coffee growth stage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, n. 2, p. 813-821. 2013.
- CEDERGREEN, N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time? **Environmental Pollution**, v. 156, n. 3, p. 1099-1104, 2008.
- CONAB. **A cultura do feijão**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes>> Acesso em: 02/08/2018.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: quarto levantamento – janeiro 2019**. Brasília: Conab, v. 6, n. 4, 126p. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 11/01/2019.
- DUKE, S.O., POLES, S.B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 1, p. 319-325, 2008.
- EMBRAPA. **O feijão comum no brasil, passado, presente e futuro**. Santo Antônio do Goiás: Empresa brasileira de pesquisa agropecuária, Centro nacional de pesquisa do arroz e feijão, 2013. Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/961699/1/seriedocumentos287.pdf>> Acesso em: 25/07/2018.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Production 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 10/01/2019.

LEMOS, L.B., MINGOTTE, F.L.C., FARINELLI, R. Cultivares. In: ARF, O., LEMOS, L.B., SORATTO, R.P., FERRARI, S. **Aspectos gerais da cultura do feijão**. 1^a ed. Botucatu: Editora FEPAF, 2015. Capítulo 10, p. 181-207.

MINARIK, C.E. et al. New growth-regulating compounds II. Substituted benzoic acids. **Botanical Gazette**, v. 113, n. 1, p. 125–147, 1951.

PINCELLI-SOUZA, R.P. **Hormesis de glyphosate em cana-de-açúcar**. 2014. xxi, 171 f. Tese (Doutorado em agricultura) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2014.

SANTOS, J.B., GAVILANES, M.L. Botânica. In: VIEIRA, C., PAULA JÚNIOR, J., BORÉM, A. **Feijão**. 2^a ed. UFV. Viçosa: Editora Viçosa, 2008. Capítulo 3, p.41-66.

SOUTHAM, C.M., EHRLICH J. Effects of extracts of western red cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. **Phytopathology**, v. 33, n. 1, p. 517–524, 1943.

STEBBING A.R.D. Hormesis-the stimulation of growth by low levels of inhibitors. **Science of Total Environment**, v. 22, n. 1, p. 213-234, 1982.

VALE, N.M. et al. Escolha de genitores quanto à precocidade e produtividade de feijão tipo carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 141-148, 2015.

VELINI, E.D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

YAMADA, T.; CASTRO, P. R. C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. **International Plant Nutrition Institute**. Piracicaba: Informações Agronômicas, 2007. 24p.