UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

INTERAÇÃO DE GLYPHOSATE E FÓSFORO: DESENVOLVIMENTO DE CAFÉ ARÁBICA, RESPOSTAS ANTIOXIDANTES EM MILHO E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Yanna Karoline Santos da Costa
Engenheira Agrônoma

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

INTERAÇÃO DE GLYPHOSATE E FÓSFORO: DESENVOLVIMENTO DE CAFÉ ARÁBICA, RESPOSTAS ANTIOXIDANTES EM MILHO E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Yanna Karoline Santos da Costa

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho

Coorientadora: Profª. Drª. Priscila Lupino Gratão

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2021

C837i

Costa, Yanna Karoline Santos da

Interação de glyphosate e fósforo: desenvolvimento de café arábica, respostas antioxidantes em milho e controle de plantas daninhas / Yanna Karoline Santos da Costa. -- Jaboticabal, 2021

81 p. : tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Leonardo Bianco de Carvalho

Coorientadora: Priscila Lupino Gratão

1. Produção vegetal. 2. Matologia. 3. Nutrição de plantas. 4. Estresse oxidativo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INTERAÇÃO DE GLYPHOSATE E FÓSFORO: DESENVOLVIMENTO DE CAFÉ ARÁBICA, RESPOSTAS ANTIOXIDANTES EM MILHO E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

AUTORA: YANNA KAROLINE SANTOS DA COSTA
ORIENTADOR: LEONARDO BIANCO DE CARVALHO
COORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO

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

Prof. Dr. LEONARDO BIANCO DE CARVALHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Fitossanidade) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof.Dr. RICARDO ALCÁNTARA-DE LA CRUZ (Participaçao Virtual)
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar / São Carlos/SP

Prof. Dr. CLAUDINEI DA CRUZ (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia-UNIFEB / Barretos/SP

Profa.Dra. NAIARA GUERRA (Participaçao Virtual)
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC / Campus Curitibanos/SC

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 18 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

YANNA KAROLINE SANTOS DA COSTA – nasceu em Tucuruí, Estado do Pará, em 10 de outubro de 1991. Em agosto de 2010 iniciou o curso de graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), graduando-se em março de 2016. Foi bolsista de iniciação científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no período de 2011 a 2014 e da Fundação Amazônia de Amparo à Estudos e Pesquisas (FAPESPA), de 2014 a 2015. Foi estagiária da Fundação de Apoio a Pesquisa, Extensão e Ensino em Ciências Agrárias (FUNPEA) e VALE S/A de 2014 a 2016 e, neste mesmo período, participou dos grupos de pesquisas Nutrição e Produção Animal na Amazônia e Manejo Integrado de Plantas Daninhas na Amazônia da UFRA (MIPDAM). Em fevereiro de 2015 realizou mobilidade acadêmica internacional na Universidade do Porto (Portugal) e foi bolsista pelo Santander Universidades, retornando em agosto de 2015. Em fevereiro de 2016, iniciou o Mestrado em Fitotecnia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), foi bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), participou do grupo de pesquisa Manejo Integrado de Plantas Daninhas da UFV (MIPD) e em março de 2018 recebeu o título de *Magister Science* em Fitotecnia, na linha de pesquisa “Plantas Daninhas, Pragas, Doenças e Impacto Ambiental”. Em 2017 iniciou o curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho na União de Ensino Superior de Viçosa (UNIVIÇOSA/FAVIÇOSA) e em setembro de 2018 recebeu o título de Especialista em Engenheira de Segurança do Trabalho. Em março de 2018 iniciou curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal. É bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e integrante do Laboratório de Matologia (LabMato). Neste Laboratório, cumpriu as obrigações a que lhe foram atribuídas, dentre elas, o cumprimento de créditos e estágio docência em Matologia. Em fevereiro de 2021, submeteu-se à defesa da tese para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.

O saber se aprende com mestres e livros.

A Sabedoria, com o corriqueiro, com a vida e com os humildes.

O que importa na vida não é o ponto de partida, mas a caminhada.

Caminhando e semeando, sempre se terá o que colher.”

(Cora Carolina)

Aos meus pais Maria Hilda e Francisco Costa

À minha irmã Anna Karla

Ao meu avô José Olímpio dos Santos

In memorian Luiza Gomes da Costa, Maria do Socorro Gomes da Costa, Maria Inês Faustino e Daniel Faustino.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, por sempre ser presente, pela força e bênçãos.

Aos meus amados pais Maria Hilda da Silva Santos e Francisco das Chagas Gomes da Costa e à minha irmã Anna Karla Santos da Costa por apoiarem as minhas escolhas e acreditarem nelas, pelo amor e confiança investidos.

Aos meus padrinhos Maria José dos Santos Jardim e Raimundo Nonato Mendes Jardim pelo amor e confiança investidos.

Aos familiares e amigos que sempre estiveram presentes, em especial Marizete Lima, José Andre, Joerlene Vieira, Dacio Costa, Maria das Graça Moraes, Wuanda Moraes, Ivailson Lobo, Pâmela Leal, Alline Meireles, David Dias, Débora Sales, Ravena Larissa, Ronandry, Saneuda, Jackeline, Rafaela Siqueira, Vanessa Pereira, Fernanda Aguiar, Djalma Pereira, Roxana Mendes, Renata Thaysa, Helane Aguiar, Hellen Silveira e Ricardo Cruz.

Das raízes não deveremos esquecer, se cheguei até aqui foi graças a todo o suporte da Universidade Federal Rural da Amazônia, Secretaria Municipal de Produção Rural de Parauapebas, à Universidade do Porto, Vale S/A, CNPq, FAPESPA, FUNPEA, Santander Universidades, à Universidade Federal de Viçosa e FAPEMIG. Em especial ao Rafael Gomes Viana, Francisco Cláudio Lopes de Freitas, Alexandre Castilho e Valdir Silva.

Ao professor e orientador Leonardo Bianco de Carvalho por toda paciência, ensinamentos, oportunidades e pelos conselhos. Aprendi que imprevistos acontecem mais do que o esperado, mas que precisamos ter calma para resolver nossas questões.

À professora e coorientadora Priscila Lupino Gratão por toda compreensão e ensinamentos.

Aos professores Silvano Bianco, Arthur Bernardes Cecílio Filho, Marcelo da Costa Ferreira, Pedro L. A. Alves, Mara Cristina Pessôa da Cruz e Davi R. Rossato. Aos servidores da UNESP Tatiana Gricio, Sonia Carregari, Marcelo Scatolin, Aldo Souza, José Martins, Wanderlei Dibelli e Ana Carla por compartilharem conhecimento e buscarem a solução de problemas. Muito obrigada.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), aos membros dos Laboratórios de Matologia, Botânica, Fisiologia em Plantas e Fertilidade do Solo e ao grupo de

pesquisa NEDTA. Em especial: Mirela Checchio, Pâmela Castro, Wilson Jr., Artur Oliveira, Guilherme Moura, Gabriela Inaba, Karina Petri, João Macri, Eduardo Nazarin, Gabriela Pelegrini, Fabiano Griesang, Fábio Carneiro, Diego Furlan e Guilherme Rosa por toda paciência e momentos compartilhados. Muito obrigada!!!

Aos amigos conquistados em Jaboticabal, que foram um grande diferencial, em especial Cherlynn Daniela, Antônio Ariclésio, Jean Lucas, Nágilla Moraes, Sabrina Juvenal, Vinicius Cesarin, Jonas Mesquita, Maelle, Livia Carvalho, Thiago Filip, Vitor Bidóia e Hagabo Paulo. Muito obrigada por todo companheirismo!

À Fazenda Bela Época pela doação de mudas de café arábica.

Ao Daniel Furlan pela doação das sementes de milho.

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

A todos aqueles que contribuíram para conclusão deste trabalho.

Muito obrigada!!!

SUMÁRIO

RESUMO ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
LISTA DE FIGURAS ..... **iv**
1 INTRODUÇÃO **1**
2 REVISÃO DE LITERATURA **3**
2.1 Café arábica 3
2.2 Milho 5
2.3 Fósforo 7
2.4 Glyphosate 8
2.5 Interação glyphosate e fósforo 10
2.6 Estresse oxidativo e sistema de defesa antioxidante 10
3 OBJETIVO **13**
3.1 Objetivo Geral 13
3.2 Objetivos Específicos 13
4 MATERIAL E MÉTODOS **14**
4.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e nutrição de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas 14
4.2 Respostas antioxidantes e nutricionais de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo 18
5 RESULTADOS **25**
5.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e nutrição de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas 25
5.2 Respostas antioxidantes e nutricionais de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo 37
6 DISCUSSÃO **46**
6.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e teores de nutrientes de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas 46
6.2 Respostas antioxidantes e do acúmulo de nutrientes de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo 50
7 CONCLUSÕES **53**
8 FINANCIAMENTO **53**
9 REFERÊNCIAS **54**

INTERAÇÃO DE GLYPHOSATE E FÓSFORO: DESENVOLVIMENTO DE CAFÉ ARÁBICA, RESPOSTAS ANTIOXIDANTES EM MILHO E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

RESUMO – As plantas jovens de café arábica e milho são sensíveis à interferência de plantas daninhas. Os teores de fósforo (P) no solo podem influenciar as respostas das plantas ao glyphosate, pois P e glyphosate competem pelo mesmo transportador. Neste trabalho, as respostas quanto ao crescimento e nutrição de plantas de cultivares de café arábica, o controle de *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens*, e, o estresse oxidativo e o sistema de defesa antioxidante de híbridos de milho cultivados em solo com diferentes teores de P, quando submetidas ao glyphosate, foram avaliados. Para isso, foram cultivadas duas cultivares de café (Catuaí Amarelo/IAC-62 e Catuaí Vermelho/IAC-144) com teores de P no solo (7, 15, 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}). Plantas de *I. grandifolia* e *U. decumbens* foram cultivadas com teores de P no solo (14 e 180 mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}). Dois híbridos de milho (convencional – sucetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate) foram cultivados com solução nutritiva com teores de P (0,5 e 2 mmol L^{-1} de P) e submetidos ao glyphosate (0 e 1080 g e.a ha^{-1}). A intoxicação causada pelo herbicida foi nula em Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho, independente do teor de P no solo. Os teores de P no solo influenciaram a altura, área foliar e matéria seca de Catuaí Amarelo e o teor de P e Ca em ambas as cultivares. No entanto, o glyphosate influenciou o crescimento de Catuaí Vermelho. Por outro lado, a aplicação de glyphosate foi eficiente no controle de *U. decumbens*, mas não controlou *I. grandifolia*. A eficácia do glyphosate sobre *I. grandifolia* diminuiu conforme aumentou o teor de P no solo. Além disso, os teores de P no solo e o glyphosate influenciaram o teor de P nas plantas de *I. grandifolia* e *U. decumbens*. Os híbridos de milho apresentaram diferentes respostas para o acúmulo de nutrientes nas plantas, com respostas positivas para o milho cultivado com 2 mmol L^{-1} de P comparado ao 0,5 mmol L^{-1} de P. O conteúdo de clorofila e carotenoides foi maior no híbrido convencional, na ausência de glyphosate. Apesar de tolerante ao herbicida, o híbrido transgênico cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P apresentou maior conteúdo de malondialdeído nas folhas. Maior atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi observada no transgênico cultivado com 2 mmol L^{-1} de P e com aplicação de glyphosate, e no híbrido convencional cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P. No entanto, maior atividade da enzima guaiacol peroxidade (GPOX) foi observada no híbrido convencional cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P e menor atividade no híbrido transgênico cultivado com 2 mmol L^{-1} de P na presença de glyphosate. Portanto, o teor de P no solo regula o crescimento e absorção de nutrientes do café e milho; a eficácia do glyphosate no controle de plantas daninhas expostos ao glyphosate. O teor de P no solo influencia na resposta do estresse oxidativo e sistema de defesa antioxidante nos híbridos de milho submetidos ao glyphosate.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, crescimento de plantas, *Ipomoea grandifolia*, acúmulo de nutrientes, *Urochloa decumbens*, *Zea mays*

INTERACTION OF GLYPHOSATE AND PHOSPHORUS: DEVELOPMENT OF ARABIC COFFEE, ANTIOXIDANT RESPONSES IN CORN AND WEED CONTROL

ABSTRACT – Arabica coffee and corn seedlings are sensitive to weed interference. Phosphorus (P) content in the soil can influence plant responses to glyphosate, as P and glyphosate compete for the same carrier within plants. In this work, the responses on the growth and nutrition of two arabica coffee cultivars, the control of *Ipomoea grandifolia* and *Urochloa decumbens*, and the oxidative stress and antioxidant defense system of maize hybrids, grown in soil with different levels of P and submitted to glyphosate, were evaluated. The two coffee cultivars Catuaí Amarelo/IAC-62 and Catuaí Vermelho/IAC-144 were grown in soils containing four P concentrations (7, 15, 40 and 172 mg dm^{-3}). Plants of *I. grandifolia* and *U. decumbens* were grown with two soil P contents (14 and 180 mg dm^{-3} of P). Coffee and weed plants were subjected to underdoses of glyphosate (0, 90 and 180 g a.e ha^{-1}). Two corn hybrids (one conventional – susceptible to glyphosate and one transgenic – tolerant to glyphosate) were grown with two nutrient solutions of P (0.5 and 2 mmol L^{-1} of P) and subjected to glyphosate (0 and 1080 g a.e. ha^{-1}). There was no poisoning caused by glyphosate in Catuaí Amarelo and Catuaí Vermelho, regardless of the soil P content. The levels of P in the soil influenced the height, leaf area and dry matter of Catuaí Amarelo and the absorption of P and Ca in both cultivars. However, glyphosate influenced the growth of Catuaí Vermelho. On the other hand, glyphosate controlled efficiently *U. decumbens*, but it did not control *I. grandifolia*. The effectiveness of glyphosate on *I. grandifolia* decreased as the soil P content increased. In addition, the soil P content and the glyphosate influenced the P concentration in the plants of *I. grandifolia* and *U. decumbens*. The corn hybrids showed different responses to the accumulation of nutrients in the plants, with positive responses for corn grown at 2 mmol L^{-1} of P compared to 0.5 mmol L^{-1}. The content of chlorophyll and carotenoids was higher in the conventional hybrid in the absence of glyphosate. Although glyphosate tolerant, the transgenic hybrid cultivated at 0.5 mmol L^{-1} of P showed a higher content of malondialdehyde in the leaves in respect to the conventional. The superoxide dismutase enzyme (SOD) activity after glyphosate application was higher in the transgenic hybrid cultivated at 2 mmol L^{-1} of P, and in the conventional hybrid cultivated at 0.5 mmol L^{-1} of P. However, greater activity of the guaiacol peroxidase enzyme (GPOX) was observed in the conventional hybrid grown at 0.5 mmol L^{-1} of P and less activity in the transgenic hybrid grown at 2 mmol L^{-1} of P in the presence of glyphosate. The soil P content regulates the growth and absorption of nutrients from coffee and corn; the effectiveness of glyphosate in controlling weeds exposed to glyphosate. The P content in the soil influences the oxidative stress response and antioxidant defense system in corn hybrids submitted to glyphosate.

Keywords: *Coffea arabica*, plant growth, *Ipomoea grandifolia*, nutrient accumulation, *Urochloa decumbens*, *Zea mays*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura média do ar e umidade relativa do ar diárias totais durante o período experimental (Estação Meteorológica Automática, FCAV/UNESP, Jaboticabal, 2019). 19

Figura 2. Caracterização das caldas pulverizadas no café e em *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens* quanto pH (a), condutividade elétrica (b), tensão superficial da gota (mN m^{-1}) (c) e viscosidade da calda (d) em relação as doses de glyphosate (0 (água da torneira), 90, 180, 1080 e 1800 g e.a. ha^{-1}). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 25

Figura 3. Valores médios de altura de plantas (cm) (a, b) e diâmetro do caule (mm) (c, d) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 e de Catuaí Vermelho/IAC-144 cultivadas em solos com diferentes teores de P (mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate em relação aos dias após a aplicação de glyphosate (DAA). 27

Figura 4. Número de folhas de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a, c) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (b, d) cultivadas em solos com diferentes teores de P (7, 15, 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) em relação aos dias após a aplicação de glyphosate. Para cada época de avaliação, médias seguidas de * foram diferentes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 28

Figura 5. Valores médios de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a, c, e, g) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (b, d, f, h) cultivadas em solos com diferentes teores de P (mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 35 e 90 dias após a aplicação (DAA). Área foliar aos 35 DAA (a-b). Área foliar aos 90 DAA (c-d). Matéria seca da parte aérea aos 35 DAA (e-f). Matéria seca da parte aérea aos 90 DAA (g-h). Para cada variável e época de avaliação, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de P no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 29

Figura 6. Teores médios de nutrientes da parte aérea (folhas e caule) (g kg^{-1} $planta^{-1}$) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (A à F) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (G

à L) em relação aos teores de fósforo no solo (7, 15 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 35 dias após a aplicação do herbicida. A e G) Nitrogênio. B e H) Enxofre. C e I) Cálcio. D e J) Fósforo. E e K) Potássio. F e L) Magnésio. Para cada nutriente, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 31

Figura 7. Teores médios de nutrientes da parte aérea (folhas e caule) (g kg^{-1} $planta^{-1}$) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a-f) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (g-l) em relação aos teores de fósforo no solo (7, 15 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 90 dias após a aplicação do herbicida. a, g) Nitrogênio. b, h) Enxofre. c, i) Cálcio. d, j) Fósforo. e, k) Potássio. f, l) Magnésio. Para cada nutriente, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 33

Figura 8. Porcentual de controle de plantas de *Ipomoea grandifolia* (a) e *Urochloa decumbens* (b) cultivadas em solos com 14 e 180 mg dm^{-3} de P e submetidas a doses de 0, 1080 e 1800 g ha^{-1} de glyphosate, aos 28 dias após a aplicação (DAA). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre os teores de fósforo no solo e médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, não diferem entre as doses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 34

Figura 9. Área foliar de *I. grandifolia* (a) e matéria seca da parte aérea de *I. grandifolia* e *U. decumbens* (b) em relação a doses de glyphosate. Teores de fósforo da parte aérea de *I. grandifolia* (c) e *U. decumbens* (d) em relação ao fósforo disponível no solo (14 e 180 mg dm^{-3} de P) e doses de glyphosate (0, 1080 e 1800 g e.a. ha^{-1}). Para cada variável e planta daninha, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as doses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=7). 35

Figura 10. Valores médios da área foliar (cm² planta^{-1}) de plantas de *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens* cultivadas em solos com diferentes teores de fósforo disponível no solo e sem aplicação de glyphosate.....36
Figura 11. Massa seca de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). A) 0 DAA – antes da aplicação de glyphosate. B) 4 dias após a aplicação (DAA). C) 8 DAA. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 37
Figura 12. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). antes da aplicação do herbicida. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).....38
Figura 13. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). aos quatro dias após a aplicação de glyphosate. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 39
Figura 14. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate) aos oito dias após a aplicação de glyphosate. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4). 40
Figura 15. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre o conteúdo total de clorofilas (a, c) e carotenoides (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos quatro (a, b) e oito (c, d) dias após a aplicação do herbicida (DAA). P-) 0,5 mmol L^{-1} de P. P+) 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3). 41
Figura 16. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre o conteúdo de MDA (µmoL mg^{-1} de massa fresca) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante

ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). P-) 0,5 mmol L^{-1} de P. P+) 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3). 42
Figura 17. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (*P)* sobre a atividade da enzima SOD (U SOD mg^{-1} proteína) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). **P-)** 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+)** 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3). 44
Figura 18. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre a atividade da enzima GPOX (UA g^{-1} massa fresca min^{-1}) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). **P-)** 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+)** 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3). 45

1 INTRODUÇÃO

O café arábica (*Coffea arabica*) e o milho (*Zea mays*) estão entre as culturas de maior importância no Brasil e no mundo. Os grãos de café fornecem uma das bebidas mais populares do mundo e são uma das mais importante *commodity* comercializável no país depois do petróleo (Carvalho; Alves; Duke, 2013; Cure et al., 2020). No Brasil, o milho é cultivado em todo território nacional, sendo destinado para alimentação humana e animal (Silva et al., 2020). Ambas culturas, possuem grande importância em virtude da geração de emprego e renda nas propriedades rurais, além de divisas na exportação e de arrecadação de impostos para o Brasil (Borém; Galvão; Pimentel, 2017; Werlang; Ferreira; Silva, 2002).

O café e o milho requerem grandes aplicações de fertilizantes (Dominghetti et al., 2014; Prado; Fernandes, 2001; Scalco et al., 2014). Dentre os nutrientes aplicados, o fósforo (P) é um dos mais importantes para o crescimento e à reprodução das plantas (Taiz et al., 2016). É um componente dos compostos das células vegetais, que têm, os fosfatos (Pi) presentes nas moléculas de açúcares intermediários da fotossíntese e respiração, como também nos fosfolipídios que compõem as membranas vegetais. Além disso, o P é um constituinte dos nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (como ATP) e no DNA e RNA (Taiz et al., 2016). Apesar da sua grande importância, o P é pouco disponível em solos tropicais, devido a sua deficiência natural e pela imobilização do fósforo em constituintes do próprio solo (Assis, 2010; Novais; Smyth, 1999; Withers et al., 2018). Por isso é necessário a adubação com este nutriente, caso contrário a produtividade é afetada.

As plantas de café arábica e milho não toleram a interferência de plantas daninhas no início do seu desenvolvimento. *Ipomoea grandifolia* também é comumente encontrada nas lavouras (Ronchi; Silva, 2004), enquanto que *Urochloa decumbens* é utilizada como planta de cobertura nas entre linhas do café e em sucessão e/ou consórcio com milho (Souza et al., 2006). Ambas espécies quando não manejadas de forma eficiente, compete com a cultura por recursos (água, luz e nutrientes), podendo comprometer o crescimento e ciclo reprodutivo das culturas

(Souza et al., 2006). Além disso, a quantidade de herbicidas seletivos ao cafeeiro é reduzida, sendo necessário o emprego de herbicidas não seletivos, como glyphosate. Os quais são aplicados em jato dirigido sobre as plantas daninhas evitando qualquer contato com a cultura (França et al., 2010b).

O glyphosate possui um grupo fosfato em sua molécula, em condições de deficiência de fosfato na planta, esta pode ser transportada por transportadores de fosfato (Andrade, 2017). Assim, alguns estudos têm demonstrado que o glyphosate e o P competem pelo mesmo transportador. Em alguns casos, o transporte do componente saturável do glyphosate pode ser competitivamente inibido na presença de fosfato (Denis; Delrot, 1993).

Nas plantas, a aplicação do glyphosate pode resultar na geração de espécies reativas de oxigênio (EROS) e aumento do estresse oxidativo (Maroli et al., 2015). O acúmulo de EROS como resultado de vários estresses (biótioco e abiótico), como radiação UV, seca, herbicidas e patógenos; é uma das principais causas da perda de produtividade das culturas em todo o mundo (Gill; Tuteja, 2010). Portanto, o acúmulo de EROS induzido por estresse é neutralizado por sistemas antioxidantes enzimáticos como superóxido dismutase (SOD, EC, 1.15.1.1), ascorbato peroxidase (APX), guaicol peroxidase (GPOX, EC, 1.11.1.7), catalase (CAT, EC 1.15.1.1) e, metabólitos não enzimáticos como ascorbato (ASH), carotenóides e flavonóide (Gill; Tuteja, 2010).

Estudos voltados para a compreensão da interação entre o glyphosate e o P e seus efeitos nas plantas são escassos; portanto, é necessário realizar estudos para verificar se a fertilização com P, em função da quantidade de P do fertilizante, influencia a seletividade de plantas de café ao glyphosate, induz diferentes respostas em relação ao crescimento das plantas, absorção de nutrientes (Costa et al., 2021), bem como no controle de plantas daninhas (*I. grandifolia* e *U. decumbens*). Como também, verificar se plantas de milho cultivadas em solos com maior disponibilidade de P, e híbridos tolerantes ao glyphosate, sofrem menor estrese oxidativo, dano ao tecido e se tem maior atividade enzimática antioxidante do que híbridos suscetíveis ao glyphosate.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da interação de glyphosate e P sobre o crescimento e nutrição de plantas de café arábica e milho, respostas antioxidante em milho e controle de plantas daninhas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Café arábica

O cultivo de café arábica (*Coffea arabica*) expandiu-se na América do Sul e América Central com base em cultivares que tiveram suas origens genéticas nas variedades botânicas Típica e, ou, Bourbon (Sakiyama et al., 2015). O café arábica é uma planta com porte arbustivo, pertencente à família Rubiácea, com caule lenhoso, lignificado, reto e quase cilíndrico (Silva et al., 2012). Dentre os cultivares de café arábica, o Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo se destacam pelo alto vigor vegetativo, porte baixo e ampla capacidade de adaptação às regiões cafeeiras (Sakiyama et al., 2015).

No Brasil, o café é uma cultura de reconhecida importância econômica e social, devido a sua representatividade no volume de produção e exportação, consumo interno, e na capacidade de geração de emprego e renda (Peloso et al., 2017). Em 2020, a produção de café no Brasil ocupou 1.885.498,1 ha, dos quais 1.514.349,1 ha foram de café arábica e 371.149 ha de café conilon (*C. canephora*) (MAPA, 2020). Com 58% da oferta mundial, o café arábica é mais valorizado por ter melhor qualidade de bebida e menor conteúdo de cafeína em relação ao café conilon, responsável por 42% da oferta restante (Mehrabi; Lashermes, 2017).

As áreas produtoras de café brasileiras estão concentradas nas regiões tropicais, cujos solos são altamente intemperizados e com baixa disponibilidade de fosfato (Pi) para as plantas (Neto et al., 2016). Logo, os fertilizantes Pi são necessários para manter a produção agrícola. Como, o fertilizante Pi pode ser adsorvido por minerais de argila ou precipitado por ferro e alumínio, o que reduz a disponibilidade de Pi em solo tropical. Assim, a disponibilidade de fósforo (P) no solo pode ser um fator limitante significativo na safra e na produção de café; sendo necessário e essencial o fornecimento de altas doses de P (Neto et al., 2016). A utilização correta de P pode promover resistência ao frio, desenvolvimento radicular, florescimento,

maturação, formação de grãos e produtividade elevada (Silva et al., 2012; Malavolta, 2006).

As plantas jovens de café são muito suscetíveis à interferência das plantas daninhas na linha do plantio, principalmente após o transplantio até o segundo ano pós-plantio (Ronchi; Silva, 2004). Quando não manejas de forma eficiente, as plantas daninhas podem competir por água, luz e nutrientes, como também comprometer ~70% da produção (Ronchi; Silva, 2004). Dentre as plantas daninhas que infestam os cafezais, destacam-se as espécies do gênero *Ipomoea* e *Urocholoa* (Ronchi; Silva, 2004). Muitos produtores tem cultivado *Urochloa decumbens* nas entrelinhas do café, por apresentar boa cobertura do solo, menor relação C/N; maior proteção do solo, contra impactos da gota da chuva e mitigação da erosão laminar (Ragassi; Pedrosa; Favarin, 2013; Santos et al., 2021). Ademais, para evitar intensas reduções no crescimento em altura e no diâmetro do caule do café, recomenda-se que a faixa de controle das plantas daninhas seja de pelo menos 100 cm de cada lado da linha (Souza et al., 2006). A *I. grandiofolia* possui alta produção de sementes, tem boa capacidade de rebrota, alta facilidade de re-infestação (Matiello, 2008), cresce junto aos cafeeiros, com hábito trepador e ao cobrir as plantas de café, reduz a luminosidade sobre as folhas e consequentemente, diminui sua atividade fotossintética (Matiello, 2020). Essa espécie vem ganhando ainda mais importância na cultura do café e milho nos últimos anos em função de dificultar a colheita e outros tratos culturais (Matiello, 2020).

O controle químico de plantas daninhas nos cafezais tem se convertido no principal método de controle (França et al., 2010a). O glyphosate, que apresenta amplo espectro de ação, baixo custo (Huang et al., 2019) e flexibilidade de aplicação (Green, 2007) é um dos herbicidas mais usado nesta cultura, em aplicação dirigidas (França et al., 2010a). No entanto, quando os herbicidas são pulverizados em condições ambientais inadequadas que favorecem à deriva, podem atingir os cafeeiros indiretamente pela pulverização (Carvalho; Alves; Duke, 2013; Schrübbers et al., 2014). A deriva de glyphosate, que causa injúrias em plantios jovem de café (Rodrigues et al., 2003; Schrübbers et al., 2014), é um dos principais entraves advindo da aplicação deste herbicida.

2.2 Milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea que pertence à família Poaceae, possivelmente originária do Continente Americano, pois no Vale de Tehuacán, Estado de Puebla, no centro de México se encontram os seus parentes selvagens mais próximos (Borém; Galvão; Pimentel, 2017). Os grãos desta planta são explorados desde os primórdios da agricultura (Borém; Galvão; Pimentel, 2017) e atualmente é uma das culturas cereais mais importantes do mundo (Elhakem; Abd El-Salam, 2018; Silva et al., 2017). O milho tem grande representabilidade na econômica internacional, pois em função de seu potencial produtivo, composição química e valor nutricional, é destinado para alimentação humana, ração para animais e produtos industriais, como o amido, fonte substancial de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel, bem como para processos de fermentação em biogás e síntese de bioetanol (Elhakem; Abd El-Salam, 2018; Silva et al., 2017). A produção global e a importância econômica do milho aumentaram constantemente durante a última década. Este incremento pode estar relacionado a adaptabilidade do milho à condições ambientais variadas e a introdução de materiais de alto rendimento (Silva et al., 2017).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, sendo cultivado em praticamente todo território nacional (Borém; Galvão; Pimentel, 2017) e estima-se colheita de ~102,3 milhões de toneladas para safra 2020/2021 (CONAB, 2021). O milho possui alto potencial produtivo, principalmente devido ao metabolismo do C4 e suas características botânicas, morfológicas e fisiológicas, que favorecem adaptação a diversos ambientes (Giraldeli et al., 2019). No entanto, apesar do grande volume da produção de grãos no Brasil, o rendimento médio de milho é baixo, com ~5,5 ton ha^{-1} (CONAB, 2021; Faria; Barros; Tuffi Santos, 2014; Silva et al., 2020).

As cuturas transgênicas oferecem uma ampla variedade de benefícios aos produtores (Sidhu et al., 2000). Genes de interesse são inseridos em organismos geneticamente modificados, fornecendo características desejadas à cultura (Faria; Barros; Tuffi Santos, 2014). Além de híbridos de milho com a tecnologia RR 2 (tolerância ao glyphosate), têm-se disponíveis no mercado atualmente híbridos com tecnologia de resistência a insetos (milho Bt) (Silva et al., 2017). Para o milho VT

PRO™ 2, a combinação das tecnologias Milho RR 2 e YieldGard® VT PRO, proporciona controle da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), da lagarta-da-espiga (*Helicoverpa zea*) e broca do colmo (*Diatrea saccharalis*), além da tolerância ao glyphosate, permitindo o controle mais eficaz das plantas daninhas (Agroceres, 2021). Mas as mudanças transgênicas tornam o controle fitossanitário e de plantas daninhas mais rentáveis em relação as variedades convencionais não transgênicas (Faria; Barros; Tuffi Santos, 2014).

A produtividade do milho é influenciada por vários fatores, entre eles a adubação e à competição com as plantas daninhas (Borém; Galvão; Pimentel, 2017; Elhakem; Abd El-Salam, 2018; Prado; Fernandes, 2001). O consumo de adubo pela cultura do milho tem aumentando nos últimos anos, em virtude do aumento por unidade de área (Prado; Fernandes, 2001). Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, talvez o P seja um dos mais limitantes no processo produtivo, especialmente em solos sob vegetação de cerrado. Os solos dessa região tem baixo teor de P disponível e altas taxas de sorção do P, o que faz necessário a aplicações de altas doses de P (Borém; Galvão; Pimentel, 2017; Novais; Smyth, 1999; Prado; Fernandes, 2001).

O milho é altamente suscetível à competição de plantas daninhas (Elhakem; Abd El-Salam, 2018). As plantas daninhas podem interferir diretamente com a cultura, pela competição por nutrientes, água, espaço e luz, e também indiretamente, quando são hospedeiras alternativas para patógenos e pragas, ou quando atrapalham a colheita safra (Corrêa et al., 2011); quando não manejas de forma correta, pode haver perdas de rendimento de ~40% (Elhakem; Abd El-Salam, 2018). Contudo, a interferência varia de acordo com o grau de competição, que dependerá do tipo de comunidade infestante, das condições edafoclimáticas, do período de convivência e das características da cultura. Além de que a coexistência com as plantas daninhas pode modificar a morfologia da planta, o acúmulo de biomassa, o crescimento da planta e o rendimento da safra (Corrêa et al., 2011). Portanto, o controle de plantas daninhas é essencial no cultivo do milho. No Brasil, várias espécies de monocotiledôneas e eudicotiledôneas são comuns nesta cultura como *Ipomoea* sp*.* e *Urochloa* sp*.* (Borém; Galvão; Pimentel, 2017; Giraldeli et al., 2019), sendo os herbicidas a principal ferramenta utilizada de controle de plantas daninhas (Giraldeli

et al., 2019; Oliveira Jr., 2011). Com o advento das culturas tolerantes ao glyphosate, este herbicida tem-se tornado o mais utilizado para tal finalidade (Giraldeli et al., 2019).

2.3 Fósforo

O fósforo (P) é um dos nutrientes minerais mais limitante para a produção das culturas vegetais que apresenta baixa mobilidade no solo (Novais; Smyth, 1999). O P (como fosfato, PO_4^{3-}) é um componente integral de compostos importantes nas células vegetais, incluindo os açúcares fosfato, intermediários da respiração e da fotossíntese, bem como os fosfolipídios que compõem as membranas vegetais. Este nutriente também é um componente de nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (como o ATP) e no DNA e no RNA (Taiz et al., 2016).

A aplicação de fertilizantes fosfatados é necessária para manter a produção agrícola (Neto et al., 2016). Uma vez que, em regiões tropicais, onde os solos ácidos altamente intemperizados tendem a fixar fortemente o P, a disponibilidade deste nutriente é limitada (Taiz et al., 2016; Tomaz et al., 2009). O P pode ser adsorvido por minerais de argila ou precipitado por ferro e alumínio (Neto et al., 2016) tornando-o, em grande parte, indisponível para as raízes (Taiz et al., 2016; Tomaz et al., 2009) e com apenas 10-20 % do PO_4^{3-} aplicado, absorvido pela cultura (Neto et al., 2016). As espécies vegetais respondem diferentemente a disponibilidade de P no solo, possuem vários mecanismos bioquímicos e fisiológicos para aumentar a eficiência de absorção e utilização do P (Reis et al., 2013).

O PO_4^{3-} é móvel na planta, podendo ser translocado tanto para a parte aérea quanto para as raízes. Após a absorção do PO_4^{3-} pelas raízes, esse nutriente é transportado através da membrana plasmática de células epidérmicas e corticais por meio de um conjunto de transportadores de PO_4^{3-} (Pereira, 2016). Adicionalmente, as plantas desenvolveram diversas estratégias para a aquisição e uso do P em ambientes de baixa disponibilidade desse elemento, como a expressão de transportadores de PO_4^{3-} (Pereira, 2016). Os transportadores de PO_4^{3-} são responsáveis pela aquisição de PO_4^{3-} através da membrana plasmática, pelo transporte de PO_4^{3-} para os cloroplastos, mitocôndrias, complexo de Golgi e pela

redistribuição de PO_4^{3-} pela planta. Além do mais, em condições de deficiência de P, algumas espécies podem alterar a expressão gênica dos transportadores de PO_4^{3-}, induzindo no aumento da expressão de transportadores de alta afinidade capazes de aumentar o influxo de PO_4^{3-} (Pereira, 2016).

O P pode aliviar o efeito tóxico da poluição nas plantas. Este nutriente aliviou a toxidade por Cd em *Chrysopogan zizanionides* (Manikandan; Ezhili; Venkatachalam, 2016) e em *Hydrocharis asiatica*, pois reduziu os conteúdos de malondialdeído e peróxido de hidrogênio e as atividades da enzima antioxidante guaiacol peroxidase (Zhong et al., 2018). Também foi observado que P contribuiu para a diminuição das concentrações de Cd no *Triticum aestivum* e aumento dos atributos de troca gasosa e enzimas antioxidantes (Arshad et al., 2016).

2.4 Glyphosate

O glyphosate [N -(fosfonometil) glicina, CAS: 1071-83-6] é um herbicida com grande disponibilidade mundial (Kruse; Trezzi; Vidal, 2000; Schrübbers et al., 2014); foi sintetizado pela primeira vez por Henri Martin em 1950, em uma empresa farmacêutica na Suíça (Muñoz, Bleak, Calaf, 2021). Vinte anos depois, o químico orgânico John Franz descobriu que o glyphosate tinha potencial herbicida. Consequentemente, esse composto foi registrado sob a marca Roundup®, para o controle de plantas daninhas (Muñoz, Bleak, Calaf, 2021).

Desde a comercialização em 1974, seu uso cresceu para dominar o mercado de herbicidas (Duke, 2018). Após o vencimento da patente da Monsanto, formulações genéricas de herbicidas à base de glyphosate, que podem apresentar diferenças na toxicidade, começaram a ser comercializadas (Ghisi et al., 2020). Como também, muito do seu uso têm sido em culturas transgênicas, tolerantes ao glyphosate, e, tem sido um dos herbicidas mais usado no mundo (Gomes et al., 2014) para o controle de plantas daninhas (Duke, 2018).

O glyphosate é um herbicida e um composto organofosforado (Muñoz, Bleak, Calaf, 2021) de ação sistêmica para aplicação em pós emergência das plantas, que quando aplicado na copa, é assimilado pela folha rapidamente (Sasal et al., 2015). A

ação não seletiva e o amplo espectro são baseados na inibição da síntese de aminoácidos essenciais (fenilalanina, tirosina e triptofano) (Leino et al., 2021; Ghisi et al., 2020; Sasal et al., 2015). Possui alta taxa de aplicação (Duke, 2018), flexibilidade de aplicação (Green, 2007) e baixo custo (Huang et al., 2019). Atualmente, o glyphosate é usado como componente ativo em muitas formulações conhecidas como herbicidas à base de glyphosate. Presente, também, em uma variedade de formas químicas, como sal de isopropilamina, Di-amônio, amônio, dimetilamina e sal de potássio, que proporciona solubilidade sem afetar suas propriedades como ingrediente ativo (Muñoz, Bleak, Calaf, 2021).

A enzima alvo bioquímica para o glyphosate é a enzima 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato sintase (EPSPS) (EC 2.5.1.19), a enzima chave da via do ácido chiquímico, que sintetiza os aminoácidos aromáticos essenciais na maioria dos procariotos, plantas e fungos (Leino et al., 2021). A inibição da EPSPS pelo glyphostate e, consequentemente, o bloqueio da via do ácido chiquímico (Piasecki et al., 2019; Schonbrunn et al., 2001), pode ter efeitos adversos potenciais em outros processos celulares, resultando em efeitos secundários, como a criação de radicais reativos. Estudos relatam que, além da ação específica do local, o glyphosate também perturba a maquinaria fotossintética ao reduzir a atividade da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) e os níveis de ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), que pode resultar na geração de espécies reativas de oxigênio (EROS). Assim, a inibição de EPSPS pode resultar em efeitos tóxicos secundários mediados pela produção de EROS (Maroli et al., 2015).

Em ambientes terrestres, o glyphosate pode atuar como um agente quelante de metal no solo, formando complexos estáveis com íons metálicos divalentes. Desta forma, sua aplicação poderia contribuir para a biodisponibilidade de macro e micronutrientes, impactando sua absorção pelas plantas (Ghisi et al., 2020).

O glyphosate pode alterar vários mecanismos fisiológicos das plantas como respiração e nutrição mineral, aumentando a peroxidação lipídica, o que diminui as taxas de transporte de elétrons fotossintéticos e degradação da clorofila (Gomes et al., 2016b, 2016a; Gomes; Juneau, 2016); causando a morte em plantas sensíveis (Piasecki et al., 2019; Tzin; Galili, 2010).

2.5 Interação glyphosate e fósforo

Entre as propriedades do solo, o teor de P tem sido considerado um dos principais fatores que controlam a disponibilidade de glyphosate. No solo, o fosfato inorgânico (Pi) e o grupo metilfosfônico do glyphosate competem com o sítio de adsorção do solo (Gomes et al., 2016b), o que poderia facilitar a dessorção e liberação do glyphosate (Zhong et al., 2018). Sasal et al. (2015) observaram forte interação entre glyphosate e P no solo, indicando que a prática da fertiizaçao Pi e a aplicação de glyphosate pode aumentar significativamente a perda de glyphosate.

Existem poucos estudos sobre o efeito do glyphosate e do Pi nas plantas. Contudo, as plantas absorvem o P através da membrana via transportador Pi. O glyphosate pode entrar nas plantas por meio de um mecanismo de difusão passivo que não é afetado pelo pH ou por meio de sistema de transporte endoplasmático via portadores de fosfato na membrana celular (Denis; Delrot, 1993; Zhong et al., 2018). O Pi pode afetar a absorção de glyphosate nas plantas, pois tanto o Pi quanto o glyphosate usam o mesmo transportador. Ademais, há evidências de que o Pi aumentou a absorção do glifosato pela raiz em *Hydrocharis dubia* e *Salix miyabeana*, evitando o estresse oxidativo causado pelo glyphosate (Gomes et al., 2016b; Zhong et al., 2018). Em contraste, *Eucalyptus grandis* com deficiência de P absorveram mais ^{14}C-glyphosate (Pereira, 2016); e a exposição do glyphosate em soja, induziu genes transportadores de P de alta afinidade, promovendo aumento na translocação do P dentro da planta (Godoy, 2007).

2.6 Estresse oxidativo e sistema de defesa antioxidante

As plantas superiores desenvolveram uma rede complexa de sistemas antioxidantes (não enzimáticos e enzimáticos) para lidar com o estresse oxidativo induzido por níveis elevados de espécies reativas de oxigênio (EROS), produzidos em resposta a condições ambientais desfavoráveis (Alves et al., 2019; Gratão et al., 2005; Sytykiewicz, 2014). Em vista disso, as EROS são moléculas tóxicas altamente

reativas, causando peroxidação lipídica, danos às estruturas celulares e morte celular (Gill; Tuteja, 2010). Quando a quantidade de EROS excede a capacidade da planta de eliminá-la por meio da ação do sistema antioxidante, ocorre a peroxidação lipídica, o processo celular mais destrutivo em organismos vivos, perda da homeostase celular, levando à perda da integridade da membrana e morte celular (Alves et al., 2019; Gratão et al., 2005; Piasecki et al., 2019). Os cloroplastos são a fonte predominante de produção de EROS como consequência da alta concentração de O_2 da fotólise e da alta energia produzida pela cadeia de transporte de elétrons fotossintética. Dessa forma, a concentração de enzimas antioxidantes no cloroplasto é alta, mas também no citosol, mitocôndrias e peroxissomos (Gill; Tuteja, 2010; Piasecki et al., 2019).

Dentre as enzimas localizadas nos diferentes compartimentos subcelulares e que compreendem a maquinaria antioxidantes incluem superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) e guaiacol peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.7) (Gill; Tuteja, 2010; Gratão et al., 2005; Miller et al., 2010).

SOD pertence à família das metaloenzimas onipresentes em todos os organismos aeróbicos (Das; Roychoudhury, 2014). Sob condições de estresses ambientais, SOD fornece a primeira linha de defesa contra os efeitos tóxicos de níveis elevados de EROS através da remoção de $O_2^{\bullet-}$ catalisando sua dismutação, um $O_2^{\bullet-}$ sendo reduzido a H_2O_2 e outro oxidado a O_2 (Gill; Tuteja, 2010; Gratão et al., 2005; Piasecki et al., 2019). Isso remove a possibilidade de formação de $OH^{\bullet}$ pela reação de Haber-Weiss. Além do mais, SOD é regulado por estresses abióticos (Das; Roychoudhury, 2014) e pode ser classificado em três isozimas com base no íon metálico que se liga, Mn-SOD (localizado na mitocôndria), Fe-SOD (localizado nos cloroplastos) e Cu/Zn-SOD (localizado no citosol, peroxissomos e cloroplastos) (Das; Roychoudhury, 2014; Sytykiewicz, 2014). Ademais, alterações significativas na atividade de SOD foram observadas em uma variedade de plantas expostas a uma gama de estresses ambientais como alta ou baixa temperatura, irradiação ultravioleta, deficiência de nitrogênio, tratamentos com herbicida, exposição a metais pesados e infecção por patógenos (Sytykiewicz, 2014).

GPOX é uma enzima que elimina o excesso de H_2O_2 durante o metabolismo normal e também durante o estresse. Esta peroxidase desempenha um papel vital na biossíntese da lignina, bem como na defesa contra o estresse biótico, degradando o

ácido indol-3-acético e utilizando H_2O_2 no processo (Das; Roychoudhury, 2014). GPOX prefere compostos aromáticos como guaiacol e pirogalol como doadores de elétrons, geralmente, oxidando ascorbato a uma taxa de ~1% do guaiacol (Gill; Tuteja, 2010). Como a GPOX é ativa intracelularmente (citosol, vacúolo), na parede celular e extracelular, é considerada a enzima chave na remoção de H_2O_2 (Das; Roychoudhury, 2014). Contudo, a atividade da GPOX varia dependendo das espécies de plantas e da condição de estresse (Gill; Tuteja, 2010). Adicionalmente, foi relatado que o aumento da atividade das enzimas antioxidantes em híbridos tolerantes ao glyphosate, pode estar relacionado à proteção contra o estresse oxidativo causado pela aplicação de glyphosate (Piasecki et al., 2019).

Os antioxidantes não enzimáticos formam a outra metade da maquinaria antioxidante, composta de ácido ascórbico, tocoferóis, polifenóis e carotenoides. Eles não apenas protegem diferentes componentes da célula contra danos, mas também desempenham um papel vital no crescimento e desenvolvimento da planta, ajustando processos celulares como mitose, alongamento celular, senescência e morte celular (Das; Roychoudhury, 2014). Dentre eles, destacam-se os carotenoides, que pertencem à família dos antioxidantes lipofílicos e estão localizados nos plastídios dos tecidos vegetais fotossintéticos e não fotossintéticos (Das; Roychoudhury, 2014).

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito das interações entre glyphosate e fósforo sobre o crescimento e nutrição de plantas de café arábica e milho, respostas antioxidante em milho e controle de plantas daninhas.

3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as respostas quanto ao crescimento e nutrição de plantas de cultivares de café arábica quando cultivadas em solos com diferentes teores de P e expostas ao glyphosate.
- Avaliar o controle de *Urochloa decumbens* quando cultivadas em solos com diferentes teores de P e expostas ao glyphosate.
- Avaliar o controle de *Ipomoea grandifolia* quando cultivadas em solos com diferentes teores de P e expostas ao glyphosate.
- Avaliar o crescimento, nutrição plantas e as respostas do sistema de defesa antioxidante em híbridos de milho quando cultivados com diferentes teores de P e expostos ao glyphosate.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e nutrição de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas[1]

Os experimentos com café arábica foram conduzidos em casa de vegetação, na Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil, no período de outubro de 2018 a julho de 2019. Os experimentos com plantas daninhas foram conduzidos de maio a dezembro de 2019. O solo utilizado em todos os experimentos era composto por 59, 20 e 21% de argila, silte e areia total; respectivamente e caracterizado como Latossolo Vermelho de textura argilosa. O solo foi coletado na camada de 0 a 20 cm em área sem histórico de aplicação de herbicidas. Após a coleta, o solo foi destorroado, seco à sombra, peneirado e, posteriormente, foi retirada uma amostra para realização de análises das características granulométrica e química (Tabela 1). Em todos os experimentos a formulação comercial de glyphosate utilizada foi Roundup WG® (Monsanto, Brasil, sal-de-amônio, 720 g e.a. kg^{-1}).

[1] Este experimento corresponde ao artigo científico publicado na revista *Scientific Reports*, disponível em: https://rdcu.be/ciFJA

Tabela 1. Resultado das análises químicas do solo, antes da adubação fosfatada e após 150 dias em contato com o adubo fosfatado, Jaboticabal – SP, 2019.

Solo	pH	M.O.	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	S.B.	CTC	V
	$CaCl_2$	g dm^{-3}	--mg dm^{-3}--			----------mmol$_c$ dm^{-3}----------						%
Antes da adubação fosfatada												
	6,2	7	6	9	20	6	1	0	13	27,4	40,3	68
Experimento com café arábica												
SI	5,5	7	7	18	14	6	0,9	0	11	20,0	31,2	64
SII	6,0	11	15	28	15	5	1,0	0	14	21,7	35,6	61
SIII	6,0	11	40	8	20	5	1,0	0	17	25,2	42,5	59
SIV	5,6	8	172	26	26	4	1,0	0	18	31,8	49,8	64
Experimento com plantas daninhas												
SV	5,9	6	14	11	31	11	10,8	0	22	52,1	74,2	70
SVI	5,8	7	180	10	34	9	9,4	0	23	52,4	75,6	69

pH em $CaCl_2$ por potênciometria; M.O. por Espectrofotometria; P em resina por Espectrofotometria; S por Turbidimetria; Ca por Espectrometria de Absorção Atômica; Mg por Espectrometria de Absorção Atômica; K por Espectrometria de Absorção Atômica; H+Al - em Tampão SMP por potênciometria; S.B. (Soma de bases) = Ca+Mg+Na+K; CTC (capacidade de troca catiônica) = S.B+H+Al; V% (índice de saturação de bases) = (SB/CTC)* 100 (Referência: Raij et al., 2001).

Resposta de cultivares de café arábica ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo

As cultivares de café utilizadas nos experimentos foram Catuaí Vermelho e Catuaí Amarelo, as quais foram submetidas a três subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}, equivalente a 0, 5 e 10%, respectivamente, da dose recomendada para o controle de plantas daninhas (1800 g e.a. ha^{-1}) e quatro teores de P disponível no solo (7, 15, 40 e 172 mg dm^{-3} de P) foram avaliadas. O experimento foi conduzido em um esquema fatorial (3 subdoses de glyphosate × 4 teores de P), com quatro repetições por interação. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de polietileno, contendo 10,0 dm^3 de solo e uma muda de café.

As diferentes concentrações (7, 15, 40 e 172 mg dm^{-3} de P) de P foram conseguidas adicionando 0 (já havia P no solo), 10, 50 ou 100 g de superfosfato triplo (46% de P_2O_5 e 12% de Ca) por vaso. O solo foi separado em lotes e o fertilizante foi homogeneizado ao solo com auxílio de uma betoneira, conforme os tratamentos. Após a adubação, o solo foi irrigado diariamente, a fim de manter 80% da capacidade de campo. Para obtenção de diferentes teores de P disponível solo, o tempo de contato

entre o adubo fosfatado e o solo foram de 150 dias (Tabela 1), para posterior transplante das mudas de café.

As mudas foram adquiridas em viveiro comercial com ~21-22 cm de altura. No dia do transplante das mudas nos vasos, foi realizado a abudação de plantio com uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, conforme recomendado para a cultura do café (Aguiar et al., 2014). Como também, foi aplicado o fertilizante foliar DACAFÉ (Stoller, Brasil), após o transplantio. A irrigação foi realizada diariamente e mantida conforme a exigência da cultura.

As mudas de café, com média de 16 (Catuaí Amarelo/IAC-62) e 17 (Catuaí Vermelho/IAC-144) folhas, foram tratadas com glyphosate 30 dias após o transplante e 180 dias após a adubação fosfatada, utilizando-se um pulverizador pressurizado por CO_2, acoplado em quadriciclo, a velocidade de 8,0 km h^{-1} e pressão de 3 bar, munido de barra com duas pontas de pulverização TT 11003 espaçadas de 0,5 m entre si, calibrado para aplicar volume de calda de 150 L ha^{-1}.

As caldas de pulverização foram caracterizadas quanto ao pH, condutividade elétrica, tensão superficial da gota e viscosidade da calda. Para realizar as análises de caracterização, as caldas foram preparadas e dispostas em Becker de 200 mL. A condutividade elétrica foi mensurada por um condutivímetro de bancada Marte® MB-11P (Marte Científica, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil). A medição do pH foi realizada em um peagâmetro de bancada (Quimis® Q400RS Bivolt, Diadema, SP, Brasil) (SANTOS et al., 2019). A análise de tensão superficial foi realizada com o auxílio de tensiômetro (DataPhysics® modelo OCA 15 Plus) equipado com uma câmera digital com alta resolução e definição temporal. O software SCA20® foi utilizado para automação e processamento de imagens. A tensão superficial foi determinada usando o método de gota pendente. O cálculo da tensão superficial foi realizado com base na equação de Yang-Laplace (Santos et al., 2019). As gotas foram avaliadas segundo a segundo durante 1 min. Para efeito de comparação padronizou-se o tempo de 10 segundos em todos os tratamentos para obtenção do valor útil da tensão superficial (Santos et al., 2019). A viscosidade das caldas (mPa.s) foi determinada em um viscosímetro (Brookfield, DV-I Prime) a 100 rpm durante 20 segundos. As leituras foram realizadas após o preparo das caldas (Assunção et al., 2019).

Variáveis avaliadas em plantas de café:

A resposta das plantas ao herbicida foi avaliada aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação (DAA). Avaliações visuais de intoxicação foram realizadas em relação ao tratamento controle (sem aplicação de herbicida). As notas de intoxicação foram atribuídas em escala variando de 0 a 100, onde se considerou 0 (zero), ausência de intoxicação e 100 (cem), morte da planta (Costa et al., 2020).

Aos 7, 14, 21, 28, 35, 42, 63, 77, 84 e 90 DAA as plantas foram mensuradas quanto altura de plantas (cm) e diâmetro do caule (mm). Aos 35 e 90 DAA as plantas, tiveram seus órgãos separados (folhas e caule) para determinação da área foliar, matéria seca da parte aérea e teores de macronutrientes.

A área foliar de cada planta foi mensurada pelo medidor Li-Cor 3000 (*Li-Cor Instruments*, modelo LI3000A). As partes da planta foram armazenadas em sacos de papel e secadas em estufa com circulação forçada de ar a 65±2 ºC até massa constante. Uma vez pesada, a parte aérea foi moída em um micro moinho tipo Wiley (Marconi, TE-840, Brasil) equipado com peneira (malha 60 *mesh*), e armazenada em sacos de papel para determinar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca).

Para determinação do teor de N, as amostras foram submetidas a digestão sulfúrica, enquanto para determinação dos teores de P, S, K, Mg e Ca, as amostras foram submetidas a digestão nitroperclórica. Após a digestão, os teores de N e P foram determinados pelos métodos semi-microkjedahl e colorimétrico do ácido fosfovanadato-molibdico, respectivamente (Sarruge; Haag, 1974); os teores de K, Mg e Ca foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Jorgensen, 1977); e o teor de S foi determinado pelo método turbidimétrico (Vitti, 1989).

Resposta de *Ipomoea grandifolia* **e** *Urochloa decumbens* **ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo**

Três sementes de *I. grandifolia* e *U. decumbens,* adquiridas comercialmente, foram semeadas por vaso (3,0 dm^3) e após a emergência foi realizado o desbaste das plantas, afim de deixar uma planta por vaso (unidade experimental). Trinta ou 100 g de superfosfato triplo foram adicionados por vaso, e, o resultado da análise química do solo foi correspondente a 14 ou 180 mg dm^{-3} de P. O tempo de contato entre o adubo fosfatado e o solo foram de 150 dias (Tabela 1).

Três doses de glyphosate (0 (controle), 1080 e 1800 g e.a. ha^{-1}) foram avaliadas. O herbicida foi aplicado sobre plantas de *I. grandifolia* e *U. decumbens* com 3 a 4 folhas-verdadeiras, nas condições descritas anteriormente para o café.

As caldas foram caracterizadas quanto ao pH, condutividade elétrica, tensão superficial da gota (Santos et al., 2019) e viscosidade da calda (Assunção et al., 2019). A resposta de cada espécide de planta daninha ao glyphosate foi realizada em experimentos separados, inteiramente casualizados com sete repetições, aos 28 DAA. Avaliações visuais de porcentagem de controle foram realizadas em relação ao tratamento controle (sem aplicação de herbicida), onde 0 (zero) corresponde à ausência intoxicação e 100 (cem), morte da planta (Costa et al., 2020). A área foliar (apenas de folhas verdes), matéria seca e teor de fósforo da parte aérea foi determinada aos 28 DAA, conforme descrito anteriormente (Sarruge; Haag, 1974).

4.2 Respostas antioxidantes e nutricionais de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo

O experimento foi realizado em estufa, no período de julho a setembro de 2019, no Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária da Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP, Brasil. O clima da região, segundo a classificação de Köeppen é do tipo Cwa, subtropical com estiagem no inverno. Os dados climatológicos do período experimental são apresentados na Figura 1.

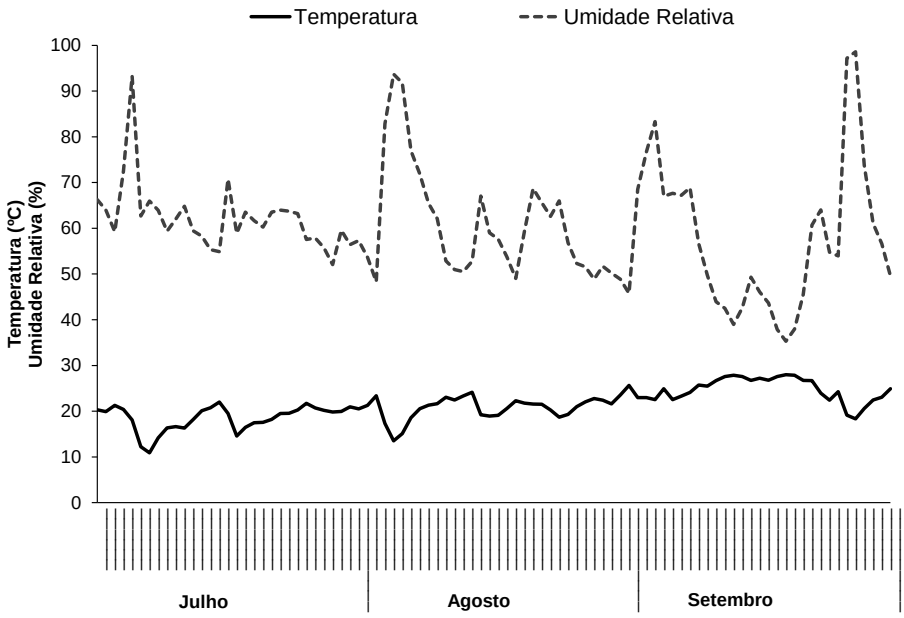

Figura 1. Temperatura média do ar e umidade relativa do ar diárias totais durante o período experimental (Estação Meteorológica Automática, FCAV/UNESP, Jaboticabal, 2019).

O estudo foi conduzido com híbrido AG 8061, o qual é caracterizado como de ciclo precoce, arquitetura foliar semiereta, possui elevado peso de grãos e espigas com bom espalhamento, grãos alaranjados e de textura semidentado; como também, possui tolerância a mancha branca (etiologia indefinida), ferrugem polissora (*Puccinia polysora*) e giberella nos grãos (*Gibeberella zeae*) (Agroceres, 2021).

Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foram avaliados dois híbridos de milho (AG 8061 convencional – suscetível ao glyphosate (**convencional**) e AG 8061 VT PRO™ 2 – tolerante ao glyphosate (**transgênico**)), com e sem aplicação de glyphosate (1080 g e.a. ha^{-1}) e duas doses de fósforo (P) 0,5 (**P-**) e 2 (**P+**) mmol L^{-1} de P. Cada época de coleta das plantas (antes da aplicação, 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida – DAA), foram avaliadas separadamente. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de polietileno, contendo 12,0 dm^3 de areia fina lavada de rio e três plantas de milho.

Irrigação

Todas as unidades experimentais receberam as mesmas condições de irrigação. A irrigação foi realizada diariamente e conforme a exigência da cultura.

Após a semeadura, a irrigação foi realizada com água deionizada até a emergência (VE). Após a emergência das plântulas, a irrigação foi realizada apenas com solução nutritiva (Tabela 2), condizente aos tratamentos.

Tabela 2. Descrição da composição das soluções nutritivas (modificada de Hoagland e Arnon, 1950). **P-**) Solução com 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+**) Solução com 2 mmol L^{-1} de P.

Solução de macronutrientes	**P-**	**P+**
	mmol L^{-1}	
Cloreto de potássio (KCl)	2,0	0,5
Fosfato monoamônico (MAP)	0,5	0,5
Fosfato monopotássico (MKP)	-	1,4
Nitrato de cálcio (Ca $(NO_3)_2$)	4,0	4,0
Nitrato de potássio (KNO_3)	4,3	4,3
Sulfato de magnésio ($MgSO_4$)	1,9	1,9
Os sais de micronutrientes foram acrescentados de acordo com a solução de Hoagland e Arnon (1950).		

Aplicação do herbicida

Antes da aplicação do herbicida, foi adicionado uma base de papel jornal, na superfície superior dos vasos, para que não houvesse deposição do herbicida na areia. Sendo este, retirado imediatamente após a aplicação do herbicida.

O herbicida foi aplicado, quando as plantas estavam no estádio V5, utilizando-se pulverizador costal pressurizado por CO_2, mantido a pressão constante de 250 kPa, munido de barra com duas pontas de pulverização TT 11002, espaçadas de 0,5 m entre si, calibrado para aplicar volume de calda de 200 L ha^{-1}. As doses de glyphosate utilizadas foram 0 (zero) e 1080 g e.a. ha^{-1} (Roundup WG®, sal-de-amônio, Monsanto, Brasil). Adicionalmente, a calda de pulverização com glyphosate foi caracterizada com 4,5, 2462 µS cm a 25ºC, 46,8 mN m^{-1} e 1,37 cP de pH, condutividade elétrica, tensão superficial e viscosidade, respectivamente. Enquanto que as características da água eram 8,1, 169,6 µS cm a 25ºC, 75,4 mN m^{-1} e 1,36 cP de pH, condutividade elétrica, tensão superficial e viscosidade, respectivamente.

Análises do acúmulo de massa seca e de macronutrientes

Antes da aplicação do herbicida, foi realizada a coleta de plantas (parte aérea e radicular), com finalidade de saber o estado nutricional das plantas antes da aplicação do herbicida. Aos 4 e 8 DAA as plantas foram coletadas e posteriormente separadas em folhas, caule e bainha, e, raízes. Em seguida, os materiais foram lavados com água deionizada, armazenados e identificados em sacos de papel, acondicionados em estufa de circulação forçada de ar a 70±2 °C por 72h, para determinação da matéria seca (g). Uma vez pesada, o material seco foi moído em um micro moinho tipo Wiley (Marconi, TE-840, Brasil) equipado com peneira (malha 60 *mesh*), e armazenada em sacos de papel para determinar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca).

Para determinação do teor de N, as amostras foram submetidas a digestão sulfúrica, enquanto para determinação dos teores de P, S, K, Mg e Ca, as amostras foram submetidas a digestão nitroperclórica. Após a digestão, os teores de N e P foram determinados pelos métodos semi-microkjedahl e colorimétrico do ácido fosfovanadato-molibdico, respectivamente (Sarruge; Haag, 1974); os teores de K, Mg e Ca foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Jorgensen, 1977); e o teor de S foi determinado pelo método turbidimétrico (Vitti, 1989).

Os dados de acúmulos dos macronutrientes para cada uma das partes da planta foram determinados multiplicando-se os teores dos macronutrientes pela massa seca correspondente. O acúmulo total foi obtido por meio do somatório dos acúmulos das diferentes partes da planta, enquanto que o teor total de cada nutriente absorvido pela planta foi obtido pela relação entre o acúmulo total do nutriente e a massa seca total acumulada pela planta.

Teor de clorofila e carotenoides

Aos 4 e 8 DAA, a quantificação do teor de clorofila e carotenoides foi realizada através da mensuração e adição de discos foliares frescos em tubos contendo com 2mL de acetona (80%) na ausência de luz e mantidos por 48 horas sob refrigeração.

Posteriormente, a absorbância das soluções foi lida em espectrofotômetro (Beckman, modelo DU-640) nos seguintes comprimentos de onda: 470 nm para carotenoides e 645 nm e 662 nm para clorofila a e b, respectivamente (Lichtenthaler, 1987). A concentração de pigmento foi expressa em microgramas de pigmento por grama de peso fresco de tecido (µg g^{-1} massa fresca).

Análises bioquímicas

Aos 4 e 8 DAA, foram coletadas amostras de folhas frescas (sem nervuras) e de raízes (lavadas em água corrente e deionizada), armazenadas em saquinhos de lâmina de papel alumínio e congeladas imediatamente em nitrogênio líquido e mantidas em ultrafreezer a -80 °C. Posteriormente, realizou-se a quantificação da concentração de malondialdeído (MDA), proteínas e enzimas antioxidantes (SOD e GPOX).

Peroxidação lipídica – malondialdeído (MDA)

A peroxidação lipídica foi medida estimando o conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS) (Heath; Packer, 1968). Os tecidos vegetais foram homogeneizados em pilão e almofariz com 20% (p/v) de polivinilpirrolidona insolúvel (PVPP) e 0,1% de ácido tricloroacético (TCA). As amostras foram centrifugadas a 10.000 x g 10 min e posteriormente, o sobrenadante (250µL) foi adicionado em 1mL da solução de TCA (20%) e TBA (5%). Esta solução foi incubada em banho-maria a 95 °C por 30 min. A reação foi interrompida por resfriamento em um banho de gelo por 10 min e centrifugada a 10.000 × g 10 min. A concentração de equivalentes de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro entre 535 e 600 nm; os dados foram calculados usando um coeficiente de extinção de 1,55 x 10^{-5} mol^{-1} cm^{-1} (Gratão et al., 2012). Os resultados são expressos em µmoL mg^{-1} de massa fresca (MF).

Proteínas solúveis totais

Os tecidos vegetais coletados (folhas e raízes), foram homogeneizados em volume tampão/peso fresco (2/1) em almofariz com pilão em tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5), contendo 1 mM de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), 3 mM de DL-ditiotreitol e 4% de PVPP (p/v). O homogenato foi centrifugado a 10.000 x g 30 min a 4 °C, e, o sobrenadante foi armazenado em alíquotas separadas a -80 °C (Azevedo et al., 1998) para posterior análise das enzimas SOD e GPOX. A quantificação de proteínas foi determinada pelo método de Bradford (1976), utilizando albumina de soro bovino como padrão.

Ensaio de Superóxido Dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

A determinação da atividade da enzima SOD (U mg^{-1} proteína), seguiu o protocolo desenvolvido por Giannopolitis e Ries (1977). O meio de ensaio foi composto por tampão fosfato de potássio (pH 7,8), 50 mM de metionina, 10 mM de EDTA, 1 mM de cloreto de nitrotetrazólio azul (NBT), 0,1 mM de riboflavina e por último o extrato vegetal. A solução foi colocada para reagir sob lâmpada fluorescente a 25 °C 5 min^{-1}. A reação resultou na formação do composto de formazana azul e a absorbância foi lida no comprimento de onda de 560 nm.

Ensaio de Guaiacol Peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.7)

A atividade de GPOX foi determinada numa mistura contendo 250µL de tampão fosfato citrato pH 5,0 (fosfato de sódio dibásico 0,2 M: ácido cítrico 0,1M), 25µL de guaiacol 0,5% e o 15µL de extrato de enzima. Posteriormente, a solução foi agitada em vórtex com adição de H_2O_2 e incubados a 30 °C, durante 15 min. A reação foi interrompida por transferência imediata para um banho de água gelada, seguida pela adição de 2% de solução de metabissulfito de sódio (Gomes-Junior et al., 2006). A atividade foi avaliada monitorando a absorbância no comprimento de onda de 450nm. Uma unidade de atividade enzimática (U) de GPOX corresponde a um aumento de 0,001 na absorbância por minuto por mg de proteína (Gratão et al., 2012).

Análise dos dados

Para cada cultivar de café e espécie de plantas daninhas, os dados foram analisados separadamente. Para análise de caracterização das caldas de pulverização, o delineamento experimental foi inteiramente ao acaso com quatro repetições. Para altura, número de folhas e diâmetro do caule até os 35 DAA foram considerados oito repetições e para as demais variáveis das plantas de café e das plantas de milho, as análises foram realizadas com quatro repetições.

Todos os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk), homogeneidade (Levene) e posteriormente avaliados por meio da análise de variância (Teste F). Quando significativo ($P<0,05$) as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software AgroEstat 1.1.0.712® e Statistix 9.0®. A análise de regressão foi realizada quando os fatores isolados foram significativos, usanto o software SigmaPlot 10.0®. A escolha dos modelos foi baseada na sua significância e no coeficiente de determinação.

5 RESULTADOS

5.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e nutrição de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas

Caracterização das caldas de pulverização

O pH, a condutividade elétrica das caldas e a tensão superficial da gota variaram conforme a concentração de glyphosate, quanto maior a dose de glyphosate maior foi a acidez da calda e condutividade elétrica e menor tensão superficial da gota. Mas, a viscosidade da calda foi maior na dose de 90 g ha^{-1} de glyphosate (Figura 2).

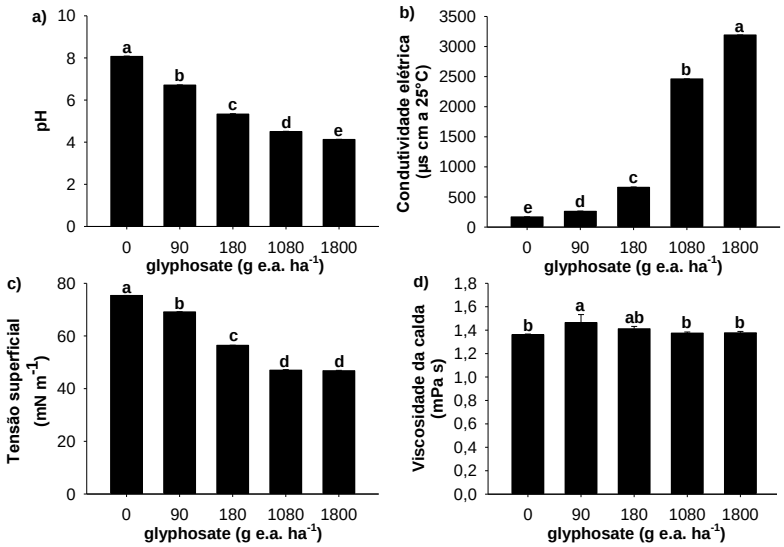

Figura 2. Caracterização das caldas pulverizadas no café e em *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens* quanto pH (a), condutividade elétrica (b), tensão superficial da gota (mN m^{-1}) (c) e viscosidade da calda (d) em relação as doses de glyphosate (0 (água da torneira), 90, 180, 1080 e 1800 g e.a. ha^{-1}). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Resposta de cultivares de café arábica ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo

As cultivares de café Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho não apresentaram sinais de intoxicação ao herbicida, independente da dose de glyphosate, teor de P disponível no solo e época de avaliação.

Efeito do P e o glyphosate no crescimento de café

Os teores de fósforo no solo foram significativos ($p<0,05$) para altura de plantas, diâmetro do caule, área foliar e acúmulo de matéria seca da parte aérea (folhas e caules) de Catuaí Amarelo até os 90 DAA. Enquanto que para essas variáveis em Catuaí Vermelho apenas a aplicação do glyphosate aos 90 DAA. A maior altura de plantas e diâmetro do caule de Catuaí Amarelo foi observado em solos com 40 e 172 mg dm^{-3} de P, respectivamente, enquanto a menor altura (24 cm) e diâmetro (4,3 mm) foi encontrado em solos com 7 mg dm^{-3} de P (Figura 3a, c). No entanto, a altura de plantas de Catuaí Vermelho foi diferente quando houve aplicação de glyphosate e entre as doses de glyphosate (Figura 3b, d). Aos 90 DAA, plantas tratadas com 90 g ha^{-1} de glyphosate tiveram maior altura (34,97 cm), no entanto, o maior diâmetro de caule (6,94 mm) foi registrado em plantas não tratadas (controle).

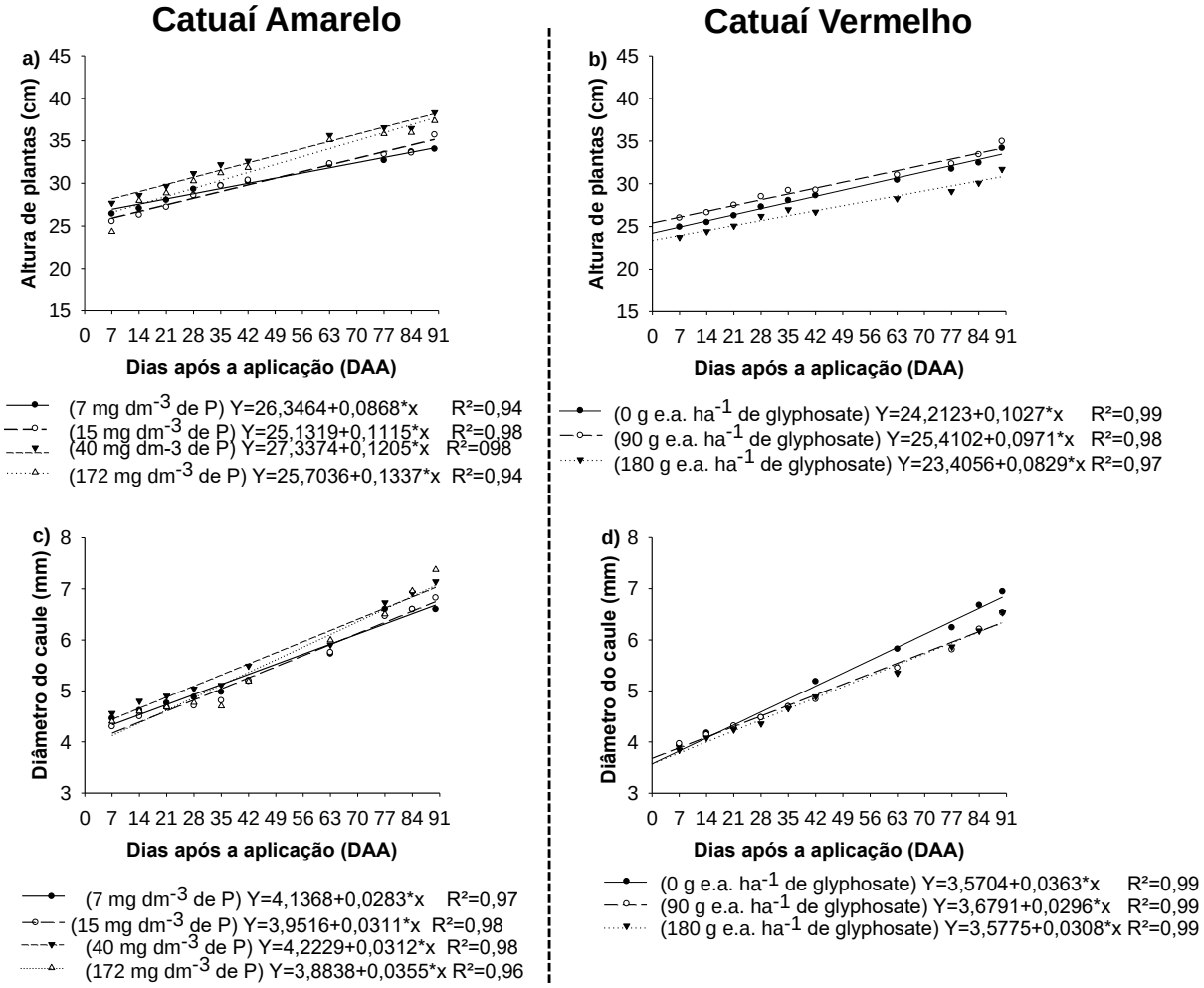

Figura 3. Valores médios de altura de plantas (cm) (a, b) e diâmetro do caule (mm) (c, d) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 e de Catuaí Vermelho/IAC-144 cultivadas em solos com diferentes teores de P (mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate em relação aos dias após a aplicação de glyphosate (DAA).

O número de folhas do cultivar Catuaí Amarelo aos 35, 77 e 84 DAA foi variável dependendo do teor de P, enquanto para o cultivar Catuaí Vermelho, esta variável não foi influenciada pelos tratamentos (Figura 4). Porém, o desfolhamento observado durante a condução do estudo foi consequência da incidência de *Cercospora coffeicola* nas plantas de café arábica, a qual foi controlada com aplicação do fungicida Opera® (epoxiconazole + pyraclostrobin, sistêmico, 1,5 L de p.c. ha^{-1}, Basf, Brasil). No entanto, este desfolhamento auxiliou na redução do número de folhas, área foliar e matéria seca, aos 90 DAA.

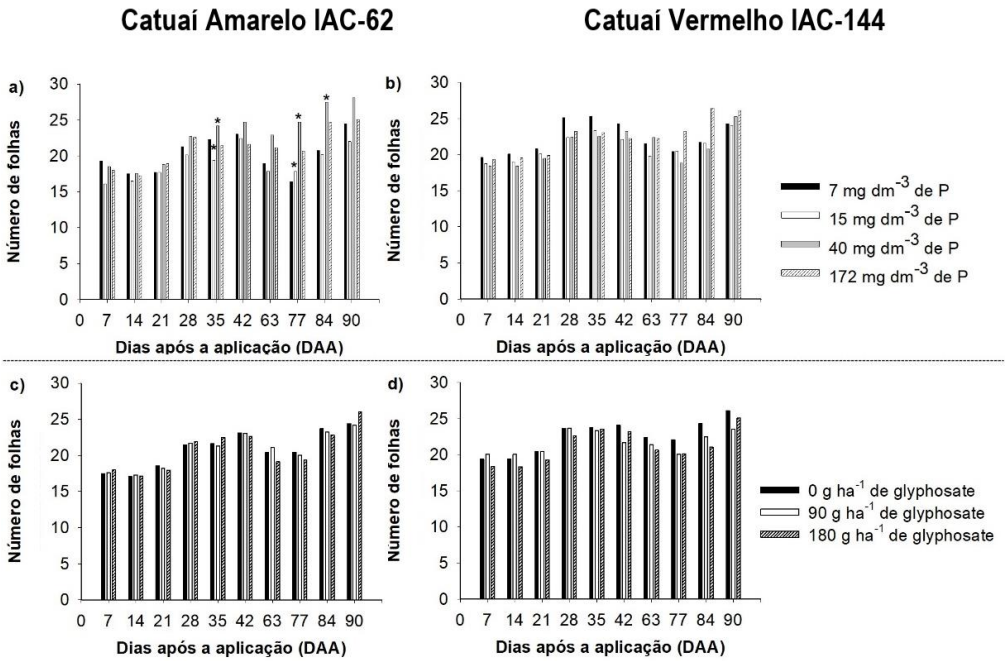

Figura 4. Número de folhas de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a, c) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (b, d) cultivadas em solos com diferentes teores de P (7, 15, 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) em relação aos dias após a aplicação de glyphosate. Para cada época de avaliação, médias seguidas de * foram diferentes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A área foliar e matéria seca da parte aérea de Catuaí Amarelo foram diferentes entre os teores de P no solo (Figura 5a, e, g). Plantas cultivadas em solos com 40 e 172 mg dm^{-3} de P, tiveram média de 635 e 591 cm^2 $planta^{-1}$ de área foliar, respectivamente, aos 35 DAA e, aos 90 DAA 585 e 554 cm^2 $planta^{-1}$ (Figura 5c). Já as plantas de Catuaí Vermelho tiveram respostas diferentes entre as épocas de avaliação (Figura 5b, d, f, h). Aos 35 DAA os teores de P foram significativos para área foliar (p=0,01) (Figura 4b) e matéria seca (p=0,007) (Figura 5f) e aos 90 DAA o glyphosate foi significativo para estas variáveis (p=0,0099 e p=0,0206, respectivamente) (Figura 5d, h). Aos 35 DAA maiores valores de área foliar (717 cm^2 $planta^{-1}$) (Figura 5b) e matéria seca da parte aérea (7,5 g $planta^{-1}$) (Figura 5f) de Catuaí Vermelho foram de plantas cultivadas em solos com 7 mg dm^{-3} de P e aos 90 DAA não tratadas com glyphosate (0 g e.a. ha^{-1}). Além disso, o glyphosate não afetou diretamente as plantas desta cultivar (Figura 5d, h). Aos 90 DAA, as plantas sem aplicação de glyphosate tiveram média de 625 cm^2 $planta^{-1}$ de área foliar e 9,6 g $planta^{-1}$ de matéria seca (Figura 5d, h).

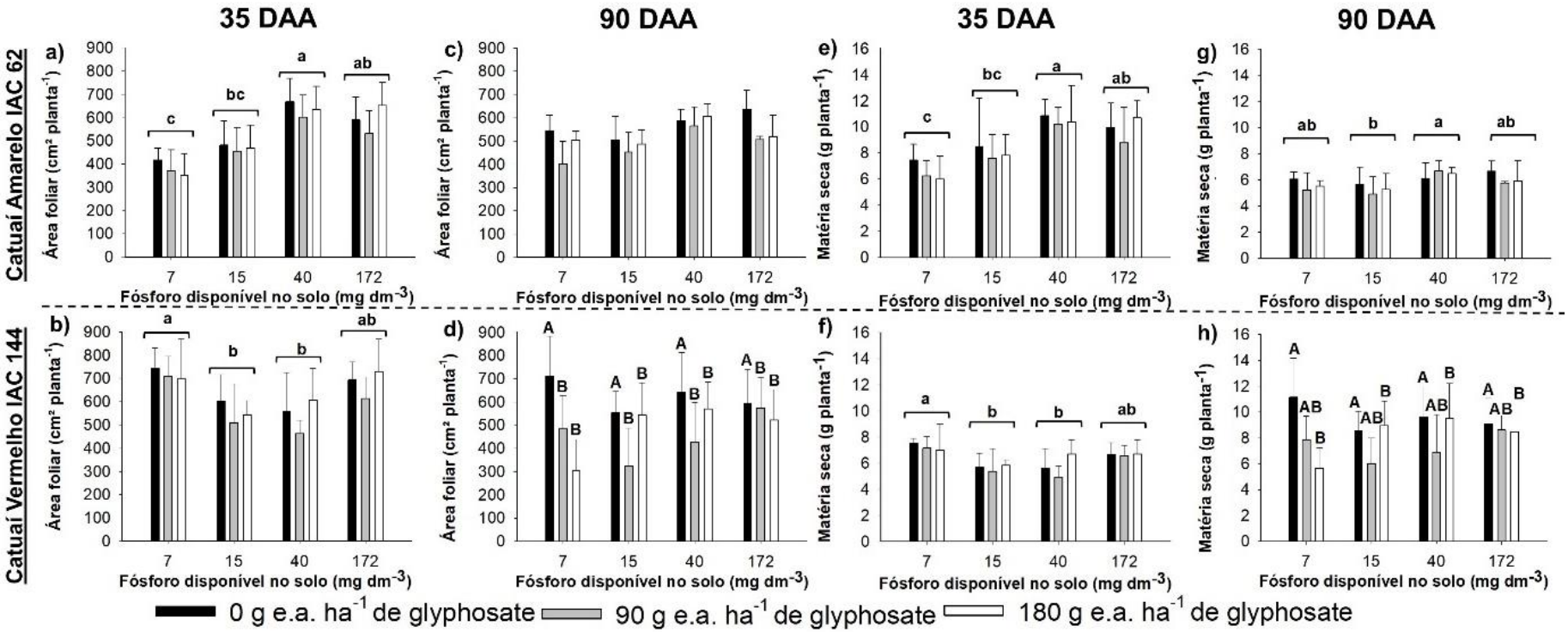

Figura 5. Valores médios de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a, c, e, g) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (b, d, f, h) cultivadas em solos com diferentes teores de P (mg dm^{-3} de P) e submetidas a subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 35 e 90 dias após a aplicação (DAA). Área foliar aos 35 DAA (a-b). Área foliar aos 90 DAA (c-d). Matéria seca da parte aérea aos 35 DAA (e-f). Matéria seca da parte aérea aos 90 DAA (g-h). Para cada variável e época de avaliação, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de P no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Teor de nutrientes

Aos 35 DAA a interação entre doses de glyphosate e teor de fósforo no solo, não influenciaram no acúmulo dos teores de N, S e P da parte aérea nas plantas de Catuaí Amarelo (Figura 6a-b, d) e de S, Ca, P, K e Mg em Catuaí Vermelho (Figura 6h-l). Para as duas cultivares de café arábica a aplicação de glyphosate não afetou o teor de P na parte aérea. No entanto, o teor de P na planta foi maior naquelas cultivadas em solo com 172 mg dm^{-3} de P (Figura 6d, j).

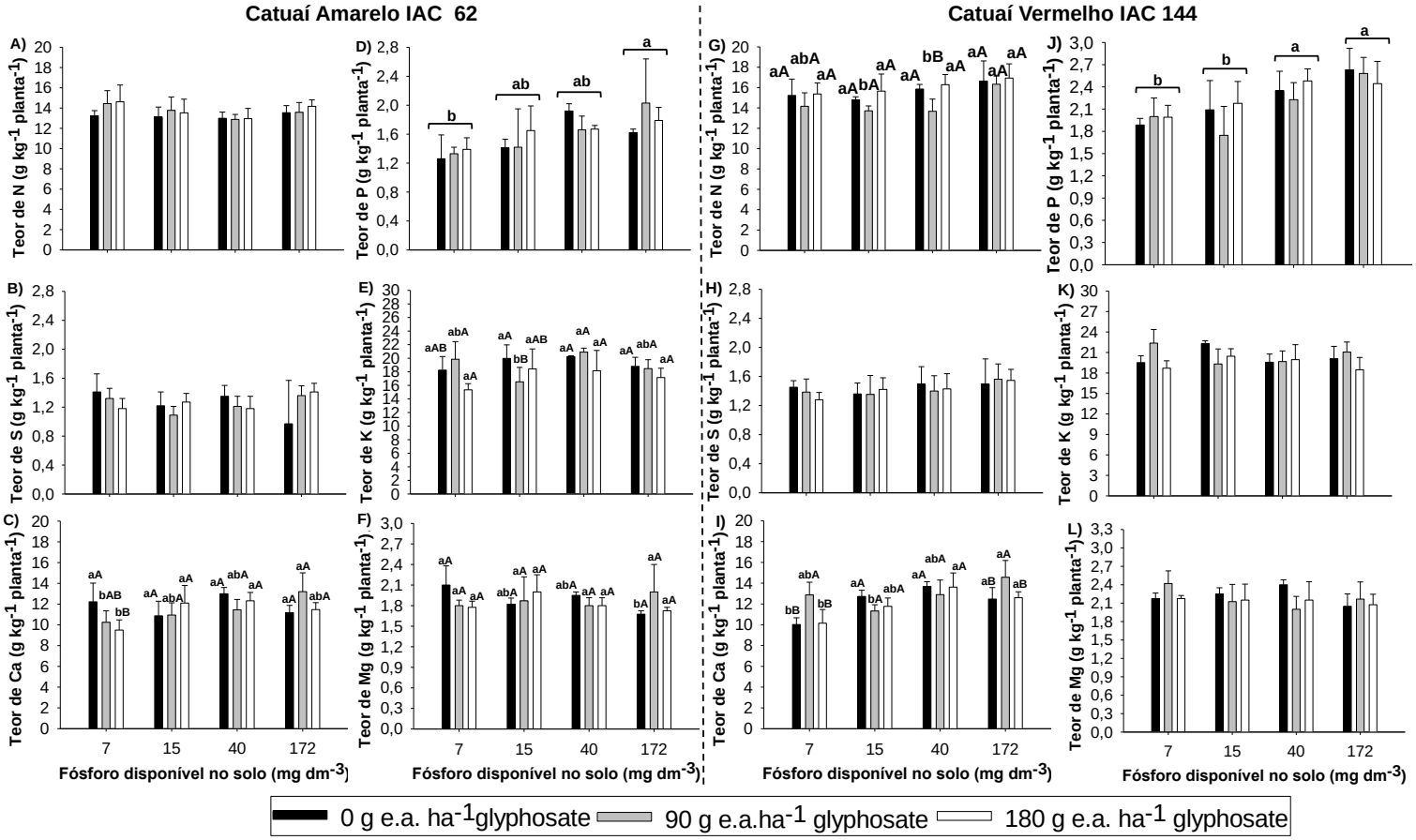

Figura 6. Teores médios de nutrientes da parte aérea (folhas e caule) (g kg^{-1} $planta^{-1}$) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (A à F) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (G à L) em relação aos teores de fósforo no solo (7, 15 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 35 dias após a aplicação do herbicida. A e G) Nitrogênio. B e H) Enxofre. C e I) Cálcio. D e J) Fósforo. E e K) Potássio. F e L) Magnésio. Para cada nutriente, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Para plantas de Catuaí Amarelo, ocorreu interação entre os teores de P disponível no solo e as subdoses de glyphosate para os teores de K, Ca e Mg (Figura 6c, e-f). O teor de K nas plantas variou conforme a subdose de glyphosate aplicada, sendo que plantas cultivadas em solos com 15 mg dm^{-3} de P e submetidas a aplicação de 90 g ha^{-1} de glyphosate, tiveram menor (16 g kg^{-1} $planta^{-1}$) teor de K e diferiu dos demais tratamentos (Figura 6e). O teor de Ca foi menor (9,5 g kg^{-1} $planta^{-1}$) em plantas cultivadas em solo com 7 mg dm^{-3} de P e aplicação de glyphosate, independente da subdose, diferindo dos demais tratamentos (Figura 6c). Vale ressaltar que este solo também tinha menor teor de Ca no solo. Plantas cultivadas em 172 mg dm^{-3} de P e sem aplicação do herbicida, obtiveram menor teor de Mg na parte aérea (Figura 6f).

Aos 35 DAA em plantas de Catuaí Vermelho ocorreu interação entre os teores de P no solo e subdoses de glyphosate para o teor de N e Ca na planta (Figura 6g, i). Menores teores de N na planta foram encontrados em café cultivado em solo com 15 e 40 mg dm^{-3} de P e aplicação de 90 g ha^{-1} de glyphosate (Figura 6g). Menor teor de Ca na planta foi encontrado quando o cultivo foi realizado em solos com 7 e 15 mg dm^{-3} de P sem aplicação do herbicida e aplicação de 180 g ha^{-1} de glyphosate nas plantas (Figura 6i).

Aos 90 DAA os teores de P no solo foram significativos ($p<0,05$) para os teores de S ($p=0,0014$), Ca ($p=0,0026$), P ($p<0,0001$) e Mg ($p=0,0058$) em plantas de Catuaí Amarelo (Figura 7b-l), e de Ca e P em plantas de Catuaí Vermelho (Figura 7i-j). Não ocorreu interação entre os teores de P no solo e glyphosate para as duas cultivares. As cultivares tiveram respostas semelhantes quando cultivadas em solos com 40 e 172 mg dm^{-3} de P, apresentando maiores teores de P e Ca (Figura 7).

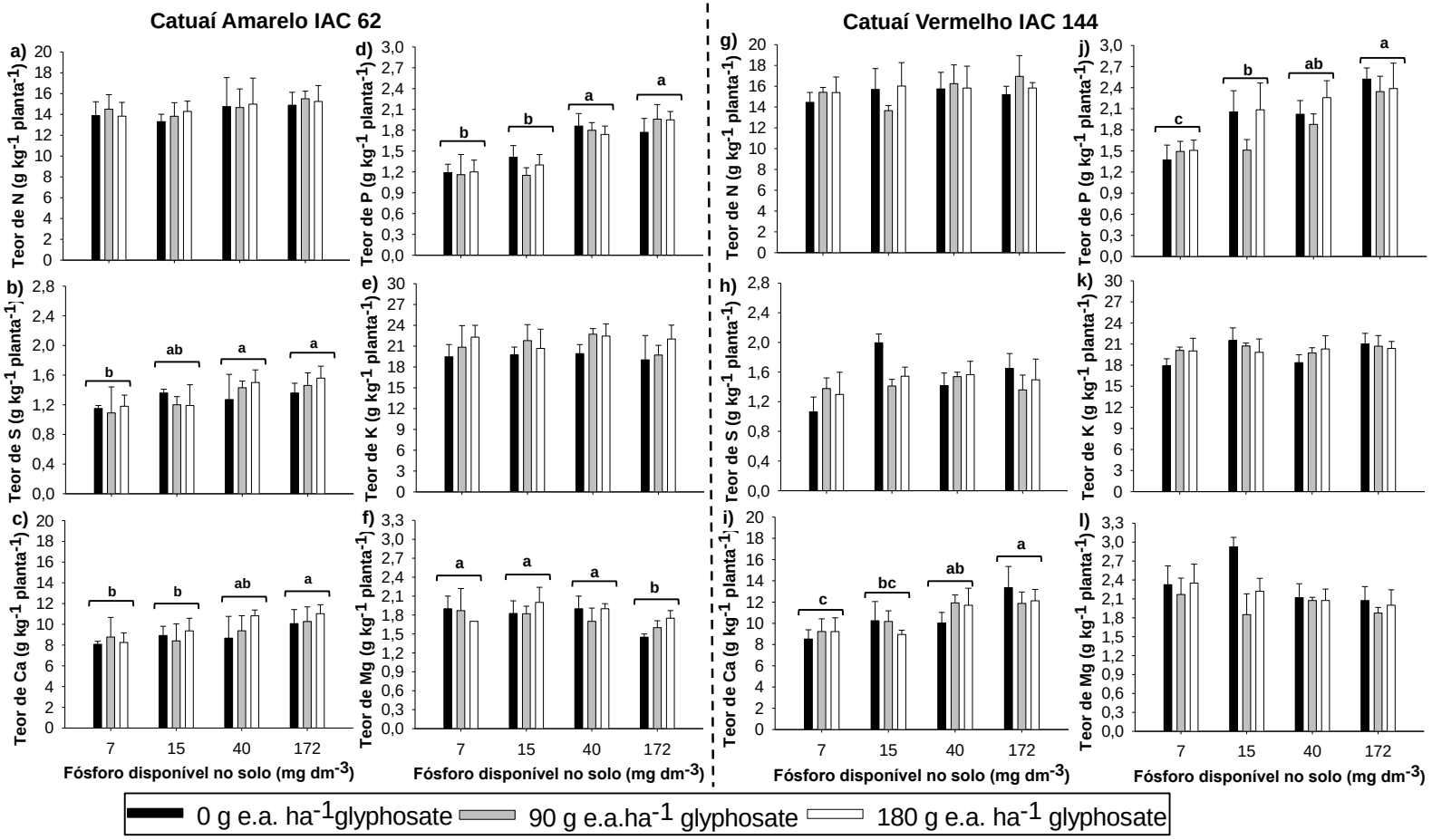

Figura 7. Teores médios de nutrientes da parte aérea (folhas e caule) (g kg^{-1} $planta^{-1}$) de café arábica cv. Catuaí Amarelo/IAC-62 (a-f) e Catuaí Vermelho/IAC-144 (g-l) em relação aos teores de fósforo no solo (7, 15 40 e 172 mg dm^{-3} de P) e subdoses de glyphosate (0, 90 e 180 g e.a. ha^{-1}) aos 90 dias após a aplicação do herbicida. a, g) Nitrogênio. b, h) Enxofre. c, i) Cálcio. d, j) Fósforo. e, k) Potássio. f, l) Magnésio. Para cada nutriente, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as subdoses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Resposta de *Ipomoea grandifolia* **e** *Urochloa decumbens* **ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo**

O glyphosate, independente da dose e do teor de fósforo no solo, não controlou *I. grandifolia*, mas foi possível observar que em solos com 180 mg dm^{-3} de P, as plantas foram mais sensíveis a aplicação de 1080 g glyphosate ha^{-1} aos 28 DAA (Figura 8a). Plantas de *U. decumbens* foram controladas pelo herbicida, independente da dose de glyphosate e teor de P no solo, com morte das plantas (100%) aos 21 DAA (Figura 8).

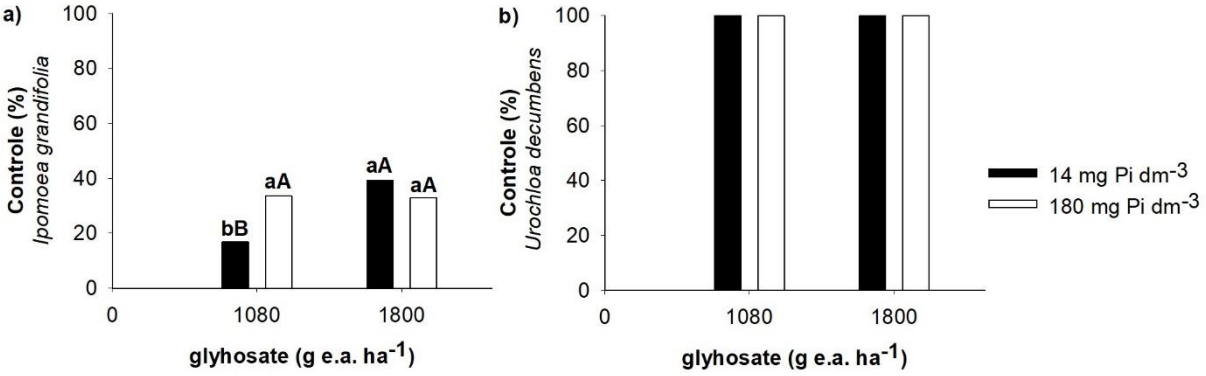

Figura 8. Porcentual de controle de plantas de *Ipomoea grandifolia* (a) e *Urochloa decumbens* (b) cultivadas em solos com 14 e 180 mg dm^{-3} de P e submetidas a doses de 0, 1080 e 1800 g ha^{-1} de glyphosate, aos 28 dias após a aplicação (DAA). Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem entre os teores de fósforo no solo e médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, não diferem entre as doses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A área foliar de *I. grandifolia* não foi afetada pelo teor de P disponível no solo (p=0,4761), mas sim pelo glyphosate (p=0,002), ou seja, quanto maior a dose de herbicida menor foi a área foliar de *I. grandifolia* (Figura 9a). A área foliar de *U. decumbens* foi realizada apenas nas plantas controle (não tratadas), pois plantas tratadas com glyphosate morreram. Não ocorreu interação entre os teores de P e doses de glyphosate (p=0,7171) para área foliar de plantas sem exposição ao glyphosate (Figura 10). Adicionalmente, solo com maior teor de P favoreceu o desenvolvimento de folhas de *U. decumbens* (Figura 10). A matéria seca da parte aérea de *I. grandifolia* (p=0,02) e *U. decumbens* (p=0,002) diminuiu conforme as doses de glyphosate aumentaram, independentemente do nível de P no solo (Figura 9b).

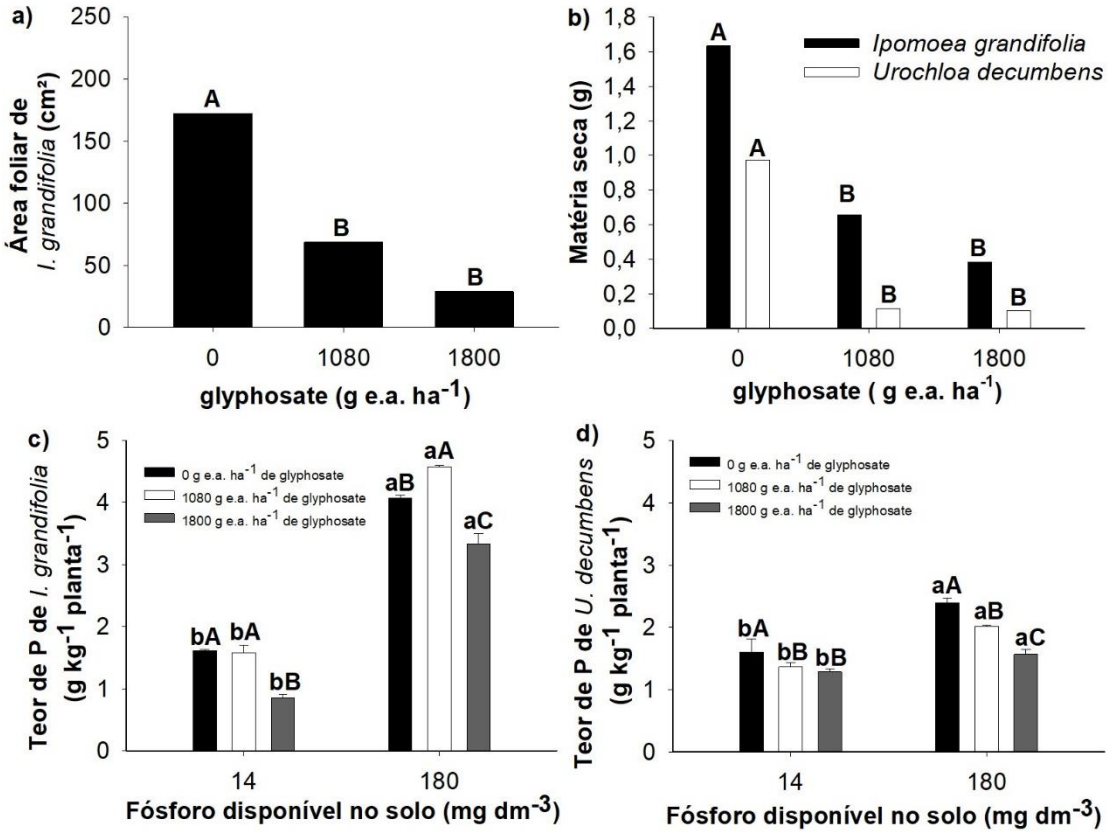

Figura 9. Área foliar de *I. grandifolia* (a) e matéria seca da parte aérea de *I. grandifolia* e *U. decumbens* (b) em relação a doses de glyphosate. Teores de fósforo da parte aérea de *I. grandifolia* (c) e *U. decumbens* (d) em relação ao fósforo disponível no solo (14 e 180 mg dm^{-3} de P) e doses de glyphosate (0, 1080 e 1800 g e.a. ha^{-1}). Para cada variável e planta daninha, letras minúsculas iguais não diferem entre os teores de fósforo disponível no solo e letras maiúsculas iguais não diferem entre as doses de glyphosate pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=7).

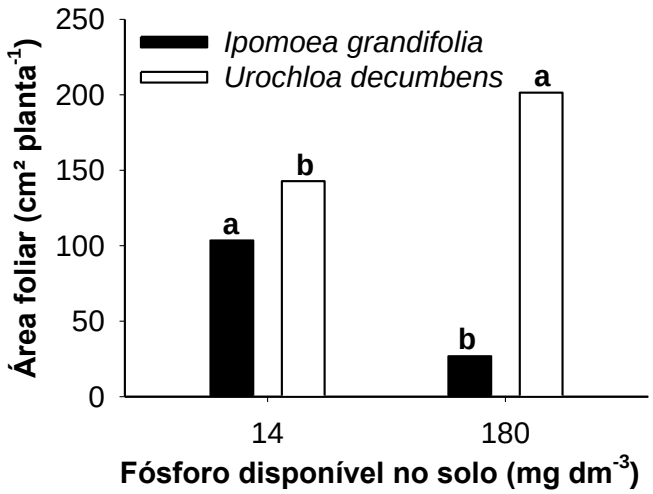

Figura 10. Valores médios da área foliar (cm² planta^{-1}) de plantas de *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens* cultivadas em solos com diferentes teores de fósforo disponível no solo e sem aplicação de glyphosate.

O teor de P nas plantas *I. grandifolia* ($p<0,0001$) e *U. decumbens* ($p=0,0004$) foi influenciado pelos teores de P disponível do solo e as doses de glyphosate (Figura 9c-d). Apesar do teor de P nas plantas ter sido maior quando cultivadas em solo com 180 mg dm^{-3} de P, as plantas de *I. grandifolia* acumularam mais P na parte aérea quando houve aplicação de 1080 g ha^{-1} de glyphosate (Figura 9c). Para *U. decumbens* quanto maior teor de P no solo maior o P na planta (Figura 9d).

5.2 Respostas antioxidantes e nutricionais de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo

Efeito do glyphosate e P no crescimento

A aplicação de glyphosate e os teores de P foram significativos para o acúmulo de massa seca dos híbridos de milho convencional (suscetível ao glyphosate) e transgênico (tolerante ao glyphosate) (Figura 11). Mesmo após a aplicação do herbicida houve acúmulo de matéria seca em milho convencional aos 4 DAA (Figura 11a, b). No entanto, plantas de milho transgênico cultivadas com 2 mmol L^{-1} de P, acumularam mais massa seca (~8,7 g) aos 8 DAA (Figura 11c).

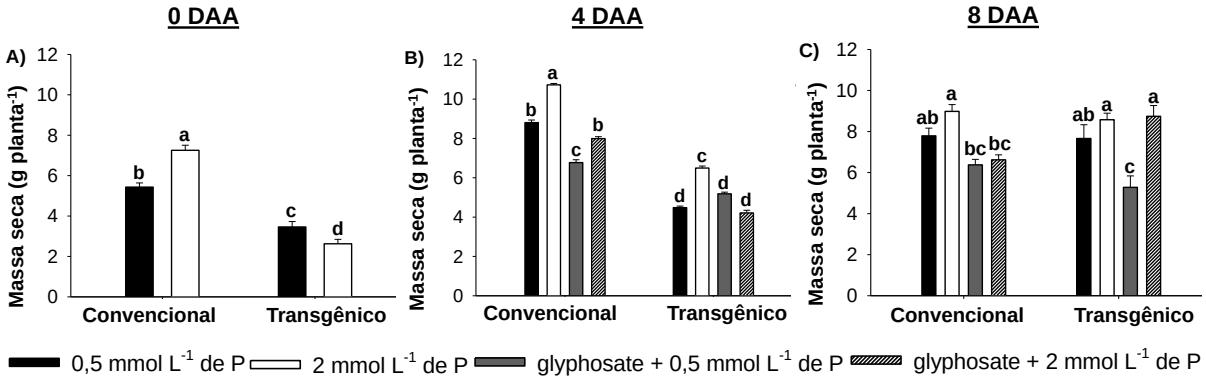

Figura 11. Massa seca de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). A) 0 DAA – antes da aplicação de glyphosate. B) 4 dias após a aplicação (DAA). C) 8 DAA. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Acúmulo de nutrientes

O acúmulo dos nutrientes N, P, S, K, Ca e Mg (Figura 12) antes da aplicação do herbicida, foi diferente entre as doses de P. Contudo o híbrido convencional acumulou mais N (91 mg $planta^{-1}$), P (23 mg $planta^{-1}$), S (27 mg $planta^{-1}$), K (316,7 mg $planta^{-1}$), Ca (79,3 mg $planta^{-1}$) e Mg (42,5 mg $planta^{-1}$) quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P (Figura 12a-f). Enquanto que o milho transgênico acumulou mais P (12 mg

planta^{-1}) quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P (Figura 12b) e Mg (19,3 mg planta^{-1}) quando cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P (Figura 12f).

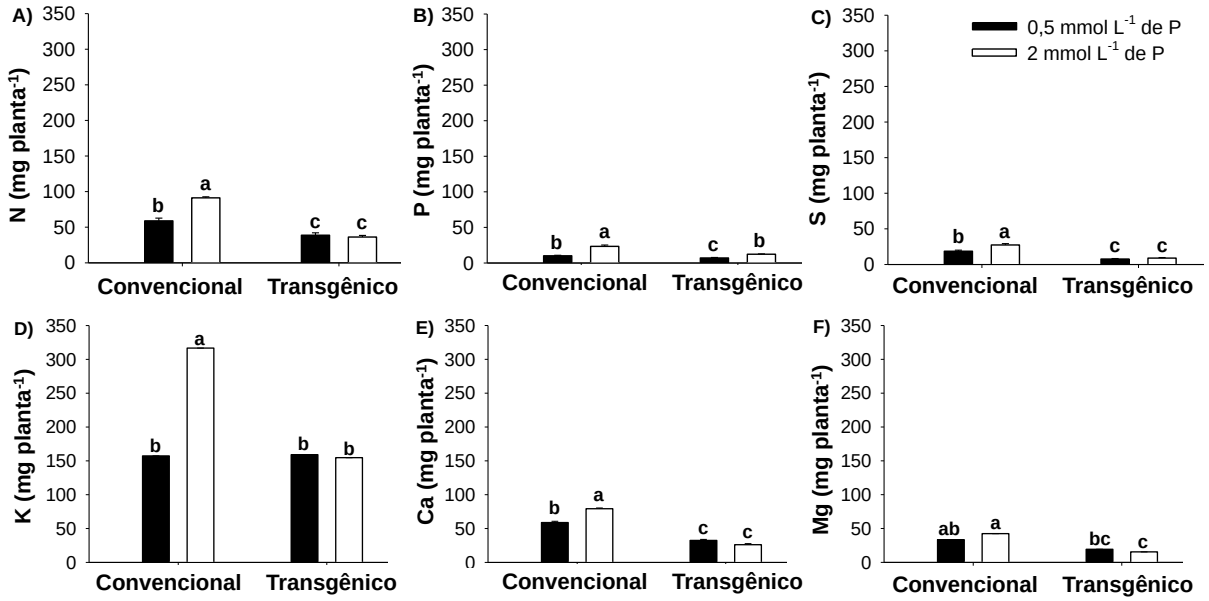

Figura 12. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). antes da aplicação do herbicida. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Aos 4 DAA o acúmulo de nutrientes foi influenciado pela interação entre o glyphosate e o P (Figura 13). Tal que, observa-se menor acúmulo de nutrientes em plantas expostas ao glyphosate e cultivadas com menor teor de P, com excessão do milho transgênico para o acúmulo de N, K, S e K (Figura 13). O híbrido convencional acumulou mais N (139 mg planta^{-1}), P (38 mg planta^{-1}), S (28 mg planta^{-1}), K (1535 mg planta^{-1}), Ca (5450 mg planta^{-1}) e Mg (740 mg planta^{-1}) (Figura 13a-f) quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P e sem exposição ao glyphosate (Figura 13). O milho transgênico acumulou mais N (81 mg planta^{-1}), P (22 mg planta^{-1}), S (23 mg planta^{-1}), K (934 mg planta^{-1}), Ca (5369 mg planta^{-1}) e Mg (762 mg planta^{-1}) quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P, sem aplicação do herbicida (Figura 13); e quando houve aplicação do herbicida, o acúmulo de P na planta foi maior quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P (Figura 13b). No entanto, não houve diferença para o acúmulo de Ca entre os tratamentos (Figura 13e).

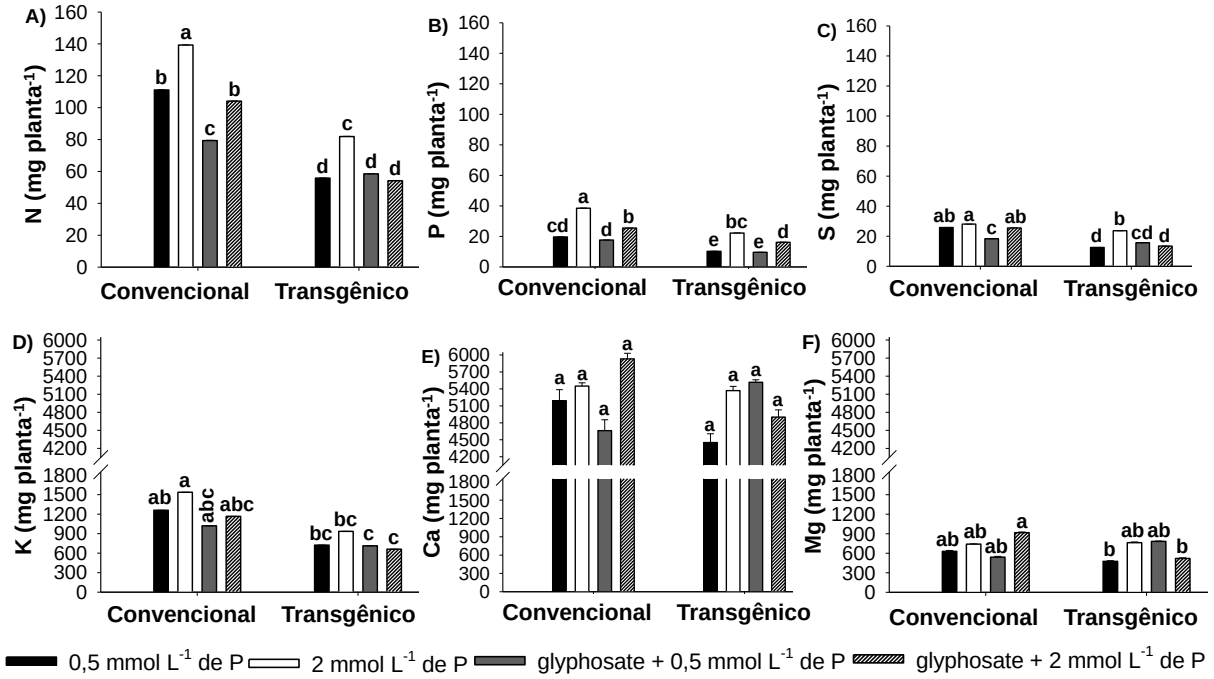

Figura 13. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate). aos quatro dias após a aplicação de glyphosate. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Aos 8 DAA a interação entre o glyphosate e P regulou o acúmulo de nutrientes (Figura 14). No entanto, ocorreu maior acúmulo de N (113 mg planta^{-1}), P (34 mg planta^{-1}), S (26 mg planta^{-1}) e Mg (171 mg planta^{-1}) (Figura 14a-c, f) quando os híbridos foram cultivados com 2 mmol L^{-1} de P, independente da aplicação ou não de glyphosate. Ademais, o maior acúmulo de P foi no milho convencional cultivado com 2 mmol L^{-1} de P, com aplicação de glyphosate (31 mg planta^{-1}) e no milho transgênico sem exposição ao glyphosate (34 mg planta^{-1}) (Figura 14b). O acúmulo de K foi maior no híbrido transgênico quando cultivado com 2 mmol L^{-1} de P sem glyphosate (1432 mg planta^{-1}) e para o híbrido convencional, sem exposição ao glyphosate (1294 mg planta^{-1}) (Figura 14d). Enquanto que o híbrido transgênico cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P e com aplicação de glyphosate, teve menor acúmulo de Ca (179 mg planta^{-1}) (Figura 14e) e de Mg (92 mg planta^{-1}) (Figura 14f), os quais diferiram dos demais tratamentos.

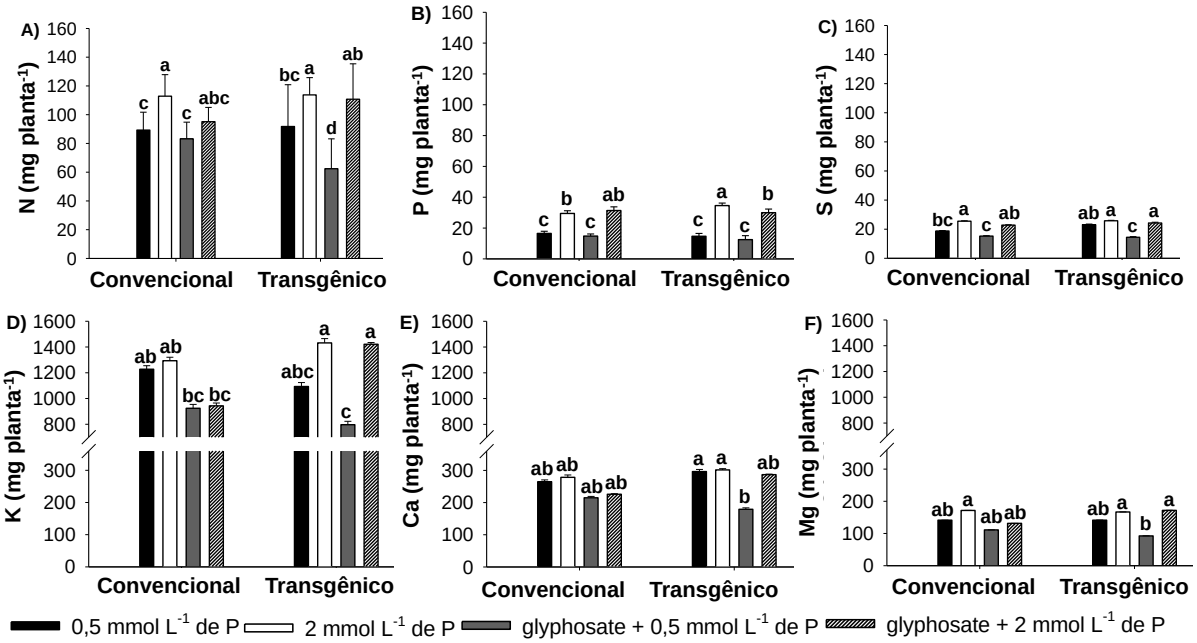

Figura 14. Acúmulo de nutrientes em híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate) aos oito dias após a aplicação de glyphosate. A) Nitrogênio (N). B) Fósforo (P). C) Enxofre (S). Letras minúsculas iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ┬ Barras verticais indicam o desvio padrão (n=4).

Clorofila total e carotenoides

O conteúdo de clorofila total e carotenoides foi diferente entre as épocas de aplicação, sendo observado redução nestes parâmetros entre as avaliações de 4 e 8 DAA (Figura 15). Diante disso, o conteúdo de clorofila total foi maior (1,3 µg g^{-1} MF) quando não houve aplicação de glyphosate e independente da dose de P, para o híbrido convencional (Figura 15a, c). Quando este híbrido foi cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P e recebeu aplicação do herbicida teve menor conteúdo de clorofila e de carotenoides tanto aos 4 quanto 8 DAA. Quando cultivado em solo com com 2 mmol L^{-1} de P e recebeu aplicação de glyphosate foi observado redução no conteúdo apenas de clorofila. No entanto, menor efeito de glyphosate e P foi observado no milho transgênico, tanto para clorofila quanto carotenoides (Figura 15).

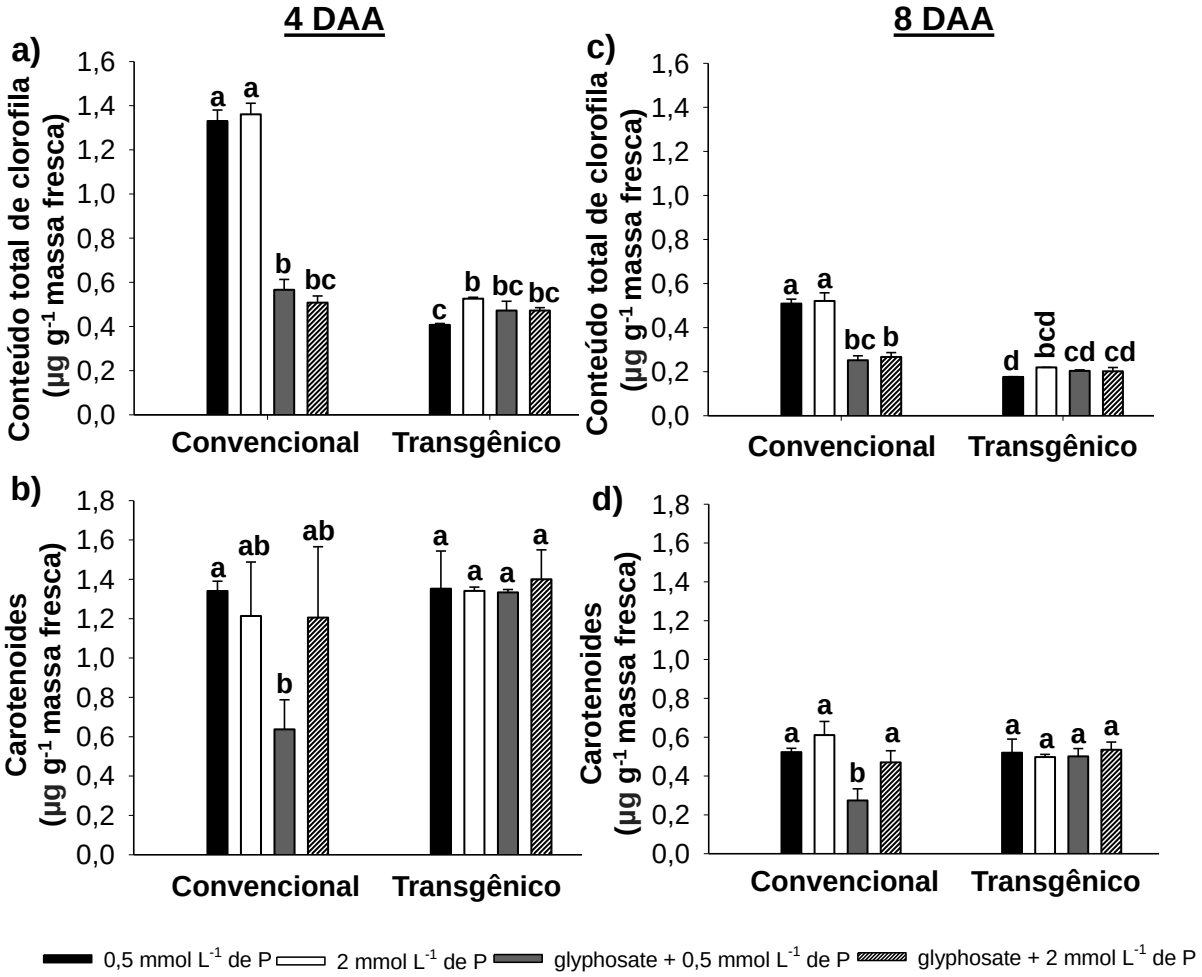

Figura 15. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre o conteúdo total de clorofilas (a, c) e carotenoides (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos quatro (a, b) e oito (c, d) dias após a aplicação do herbicida (DAA). P-) 0,5 mmol L^{-1} de P. P+) 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3).

Peroxidação lipídica – malondialdeído (MDA)

O conteúdo do MDA foi maior em folhas do que em raízes (Figura 16), independente da época de avaliação. Em folhas o híbrido convencional cultivado com 2 mmol L^{-1} de P, sem aplicação de glyphosate, foi o que teve menor concentração de MDA em folhas tanto aos 4 quanto aos 8 DAA. Enquanto que, este híbrido mesmo cultivado com 2 mmol L^{-1} de P, mas submetido ao glyphosate, foi o que teve maior conteúdo de MDA em folhas nas duas épocas avaliadas (Figura 16a, c). O híbrido

transgênico inicialmente apresentou menor conteúdo de MDA em folhas aos 4 DAA, mas com aumento aos 8 DAA. O estresse nas raízes foi menor em relação as folhas, apesar de que o híbrido convencional cultivado com 2 mmol L^{-1} de P e submetido ao glyphosate teve redução do conteúdo de MDA aos 8 DAA (Figura 16b, c). Comportamento similar foi observado em raízes de híbrido transgênico, cultivado com 2 mmol L^{-1} de P, mas sem exposição ao glyphosate, ocorreu redução do conteúdo de MDA (Figura 16b, c).

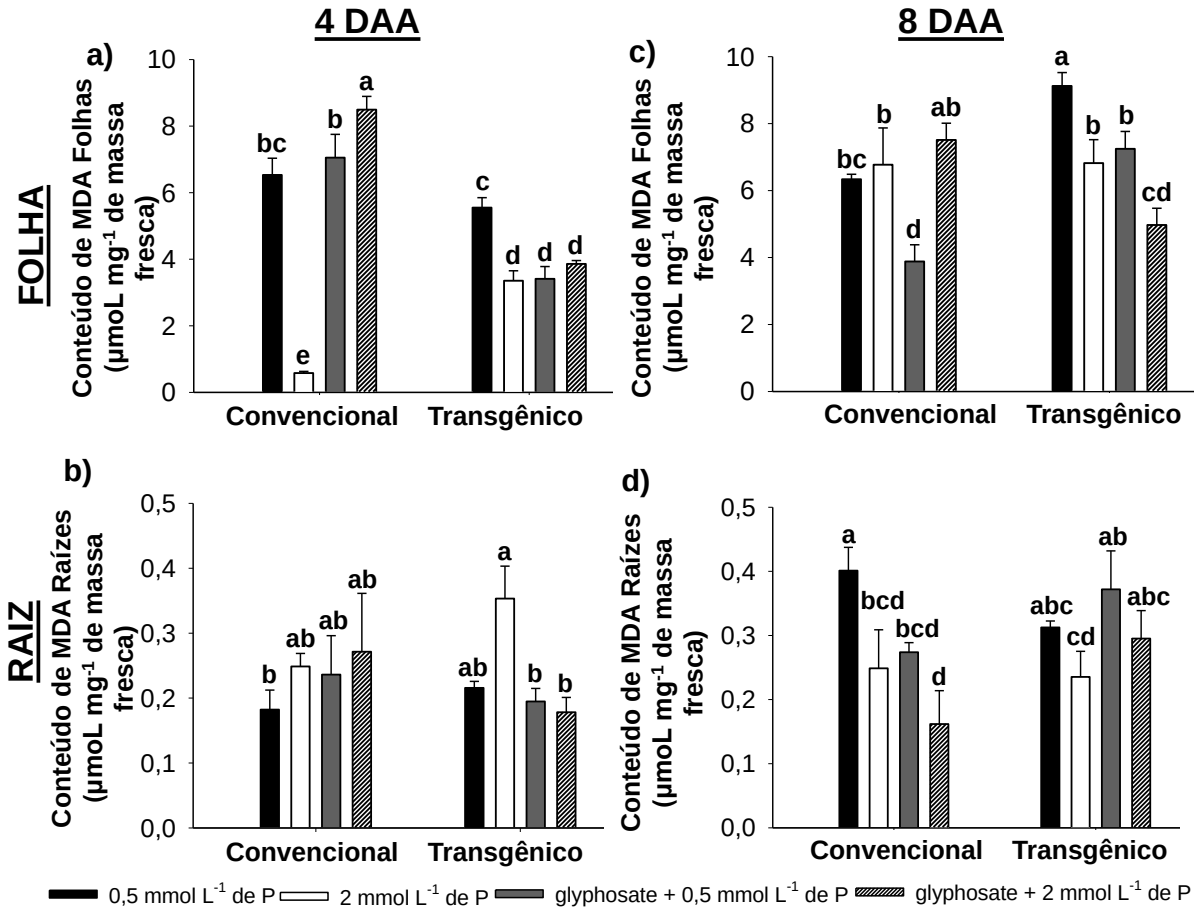

Figura 16. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre o conteúdo de MDA (µmoL mg^{-1} de massa fresca) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). **P-)** 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+)** 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3).

Superóxido Dismutase

A atividade da SOD em folhas foi menor que nas raízes, independente do híbrido, dose de P, aplicação de glyphosate e época avaliada (Figura 17). Nas folhas, maior atividade da enzima ocorreu aos 4 DAA, mas não ocorreu diferença entre os híbridos de milho (Figura 17a). Contudo, aos 8 DAA ocorreu redução da atividade da enzima, principalmente em folhas do milho convencional cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P (18 U SOD mg^{-1} proteína) sem aplicação de glyphosate, e, quando houve aplicação do herbicida, independente do teor de P. Ademais, destaca-se que em folhas do transgênico cultivado com 2 mmol L^{-1} de P e submetido ao herbicida, houve maior atividade da enzima SOD (20 U SOD mg^{-1} proteína) diferindo de plantas cultivadas com 0,5 mmol L^{-1} de P, deste mesmo híbrido (Figura 17c).

Nas raízes a atividade da enzima foi diferente entre os híbridos, aos 4 DAA maior atividade da SOD foi em plantas do milho convencional, submetidas a aplicação do herbicida (~89,3 U SOD mg^{-1} proteína) (Figura 17b) e quando o híbrido transgênico (81 U SOD mg^{-1} proteína) foi cultivado com 0,5 mmol L^{-1} de P, sem aplicação de glyphosate (Figura 17b). Adicionalmente, aos 8 DAA a atividade da SOD nas raízes, foi maior no híbrido transgênico (61,8 U SOD mg^{-1} proteína) (Figura 17d).

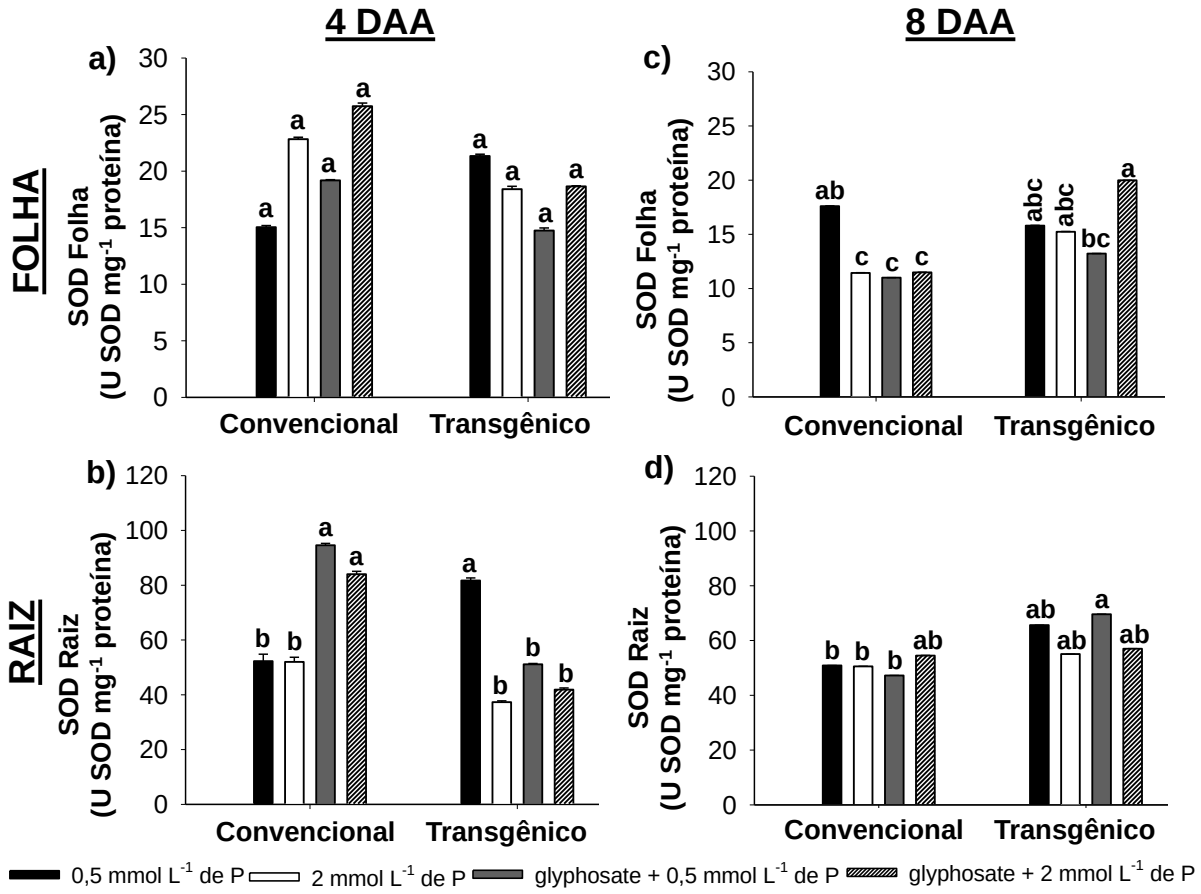

Figura 17. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (*P)* sobre a atividade da enzima SOD (U SOD mg^{-1} proteína) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). **P-)** 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+)** 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ┬ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3).

Guaiacol Peroxidase (GPOX)

A atividade da enzima GPOX foi diferente tanto em folha quanto em raízes, entre as épocas avaliadas, híbridos de milho, doses de P e glyphosate (Figura 18a-d). No entanto, observa-se que a atividade da enzima em folhas foi menor aos 4 DAA (Figura 18a) nos dois híbridos, com posterior aumento da atividade da GPOX aos 8 DAA (Figura 18c). Ademais, o híbrido convencional, cultivado com 2 mmol L^{-1} de P e submetido ao herbicida foi o que teve menor (0,2 UA g^{-1} MF min^{-1}) atividade da enzima em folhas aos 4 DAA (Figura 18a), mas aos 8 DAA foi que apresentou maior (1,2 UA g^{-1} MF min^{-1}) atividade da GPOX (Figura 18c). Porém, o milho transgênico cultivado

com 2 mmol L^{-1} de P e submetido ao glyphosate, aos 8 DAA foi o que apresentou menor atividade da GPOX (0,4 UA g^{-1} MF min^{-1}) nas folhas (Figura 18c). Adicionalmente, em raízes deste mesmo híbrido e tratamento, maior (0,9 UA g^{-1} MF min^{-1}) atividade da GPOX foi aos 4DAA (Figura 18b) com posterior redução da atividade enzimática nos tecidos radiculares (0,2 UA g^{-1} MF min^{-1}), aos 8 DAA (Figura 18d).

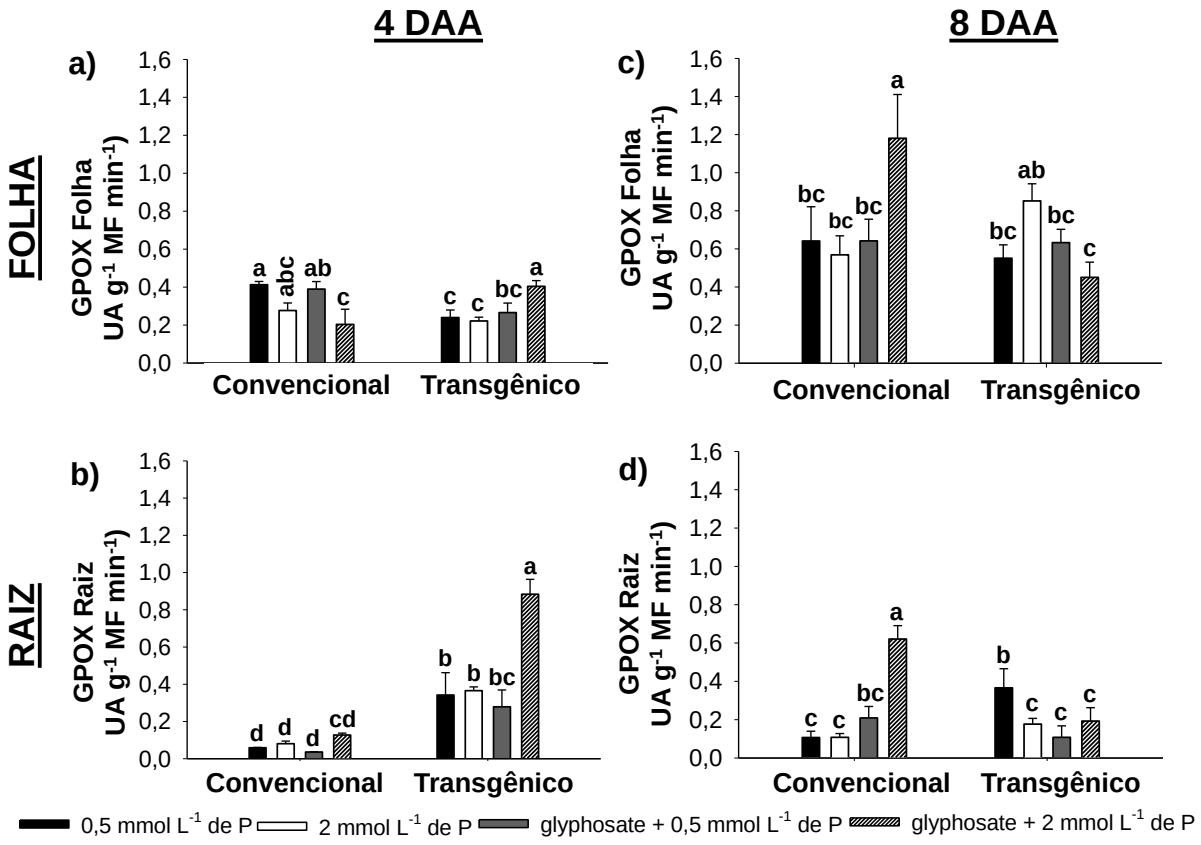

Figura 18. Efeito das doses de glyphosate (0 e 1080 g e.a. ha^{-1}) e fósforo (P) sobre a atividade da enzima GPOX (UA g^{-1} massa fresca min^{-1}) nas folhas (a, c) e raízes (b, d) de híbridos de milho (convencional – suscetível ao glyphosate e transgênico – tolerante ao glyphosate), aos 4 e 8 dias após a aplicação do herbicida (DAA). **P-)** 0,5 mmol L^{-1} de P. **P+)** 2 mmol L^{-1} de P. Para cada período de avaliação, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). ⊤ barras verticais indicam o desvio padrão (n=3).

6 DISCUSSÃO

6.1 Efeito de glyphosate e fósforo no crescimento e teores de nutrientes de cultivares de café arábica e no controle de plantas daninhas

A redução do pH, conforme aumentou a concentração de glyphosate na calda, pode ser justificado pelo fato de que os grupos de fosfatos e carboxílicos do glyphosate tem maior caráter ácido que o amônio (Amarante Junior et al., 2002). Portanto, maiores concentrações do herbicida diminuem o pH da calda melhorando a eficácia, corroborando que o pH da calda interfere na atividade do herbicida (Carvalho et al., 2009).

A redução da tensão superficial da gota conforme maior concentração de glyphosate, melhora o espalhamento da calda nas folhas, porém diferenças na epiderme das cultivares podem afetar o espalhamento (Santos et al., 2019). O aumento da condutividade elétrica conforme as doses de glyphosate aumentaram, pode estar relacionado ao aumento de íons livres na solução e interligada a eficácia da ação herbicida nas plantas (Amarante Junior et al., 2002; Cunha; Alves; Marques, 2017).

A viscosidade aumentou conforme ocorreu incremento da dose de glyphosate, esta viscosidade da calda está correlacionada ao tamanho de gotas no momento da pulverização, quanto maior a viscosidade maior será o tamanho de gotas e possivelmente menor risco de deriva (Cunha et al., 2003).

6.1.1. Resposta de cultlivares de café arábica ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo

As cultivares Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho não tiveram sinais de intoxicação pelo glyphosate, isso pode estar associado as doses relativamente baixas de glyphosate, em relação a dose aplicada para o controle das plantas daninhas. Estudos realizados em solos com menores teores de P no solo (2,3 mg dm^{-3} de P) e aplicação de subdoses de glyphosate em diferentes cultivares de café arábica

(Acaiá/MG-6851, Catucaí Amarelo/2SL, Topázio/MG-1190, Oeiras MG-6851) relataram sinais de intoxicação nas plantas pelo herbicida e atribuíram que pode haver tolerância diferencial entre cultivares de café ao herbicida (Carvalho et al., 2013, 2014; França et al., 2010b, 2010a, 2013; Reis et al., 2018). Portanto, provavelmente os teores de P no solo podem ter influenciado na reduzida intoxicação.

As cultivares Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho tiveram diferentes respostas ao crescimento, pois a área foliar e acúmulo de matéria seca foi menor em Catuaí Vermelho aos 90 DAA conforme o aumento das doses dde glyphosate. Essa diferença possivelmente se deve a capacidade diferencial entre essas cultivares para metabolizar ou degradar o herbicida em compostos menos tóxicos ou não tóxicos (Reddy et al., 2008). No entanto, alguns herbicidas podem não apresentar sinais de intoxicação, mas podem comprometer o crescimento e o desenvolvimento das plantas pelo resto do ciclo da cultura (França et al., 2013).

Tal qual, foi encontrado estimulo ao crescimento quanto altura de plantas, diâmetro, número de folhas, área foliar e acúmulo da matéria seca da parte aérea quando Catuaí Vermelho foi cultivado em solo com 26 mg dm^{-3} de P e submetido a 180 e 360 g ha^{-1} de glyphosate (Carvalho; Alves; Duke, 2013). No entanto, foi observado que cultivares de Acaiá, Catucaí Amarelo e Oeiras submetidas a 460,8 g ha^{-1} de glyphosate tiveram redução no incremento de altura, área foliar e matéria seca destas cultivares (França et al., 2010b, 2013), reforçando que há resposta diferencial entre as cultivares de café arábica.

Nesse trabalho o glyphosate não afetou o número de folhas, independente da cultivar de café. Isto pode estar relacionado ao fato de que as subdoses do herbicida não foram o suficiente para ocasionar injúrias nas plantas. Efeito semelhante foi observado quando houve aplicação de subdoses de glyphosate (57.2, 115.2, 230.4 g ha^{-1}) em Catuaí/IAC-144, Acaiá/IAC 479-19 e Catucaí Amarelo/2SL (França et al., 2013; Reis et al., 2018).

O teor de nutrientes nas cultivares Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho foi influenciado pelos teores de P no solo, mas não pelas subdoses de glyphosate. Além disso, essa resposta foi diferente entre as cultivares. Estas cultivares já foram classificadas como menos eficientes e responsivas ao fornecimento de Pi no solo, em relação as Cultivares Acaiá/IAC-474-19, E16 Shoa/IAC-2027 e E22 Sidamo/IAC-2032

quando cultivadas em solos com baixo (8 mg dm^{-3} de P) e alto (120 mg dm^{-3} de P) teor de P (Neto et al., 2016).

As cultivares Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho acumularam mais P e Ca quando cultivadas em solos com maior teor de P, mas o Catuaí Amarelo foi mais eficiente no acúmulo de teores de S e Mg nas plantas em solos com maiores teores de P. Por outra parte, a aplicação de glyphosate reduziu os teores de N, P e K em folhas de Catucaí, Oeiras, Topázio (França et al., 2010a) e Catuaí Vermelho/IAC-99 (Carvalho et al., 2014) , e aumentou os teores de Ca destas cultivares (Carvalho et al., 2013; França et al., 2010a) sem afetar o acúmulo de teores de N, P, K, Ca, Mg e S nas plantas de Catuaí Vermelho (Carvalho; Bianco; Prado, 2012). O acúmulo de nutrientes dessas cultivares foi influenciado pela dose de glyphosate (360 g e.a. ha^{-1}) a que foram submetidas. Portanto, a resposta diferencial entre cultivares de café arábica, Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho, ao teor de P no solo afeta o crescimento e nutrição dos cafeeiros quando cultivados em solos com diferentes teores de P e tratados com glyphosate.

6.1.2. Resposta de *Ipomoea grandifolia* e *Urochloa decumbens* ao glyphosate e ao fósforo disponível no solo

Ipomoea grandifolia não foi controlada eficientemente pelo glyphosate, independente do teor de P no solo. Esta planta daninha tem sido caraterizada como tolerante ao glyphosate e essa tolerância ocorre devido a menor translocação do herbicida na planta (Monquero et al., 2004). Em plantas cultivadas em solos com maior teor de P, a eficiência do glyphosate foi menor e aumentou o teor de P na planta. Isto sugere que o teor de P no solo reduz a eficácia do glyphosate no controle de *I. grandifolia*. A dose de aplicação, idade e tamanho das plantas daninhas, volume de pulverização e a qualidade da água, também podem influenciar a eficácia do herbicida (Li et al., 2012). Doses de glyphosate de 460 e 920 g e.a. ha^{-1} controlaram *I. grandifolia* em 78,5 e 99,0%, respectivamente, com redução de matéria seca aos 35 DAA (Ramires et al., 2010). Em outro estudo, o crescimento de *I. grandifolia,* cultivada em substrato comercial, foi reduzido em 50% com 615,5 g e.a. ha^{-1} de glyphosate aos 21DAA (Lacerda; Victoria Filho, 2004). Estes resultados evidenciaram que a tolerância

natural em relação a outras plantas daninhas ao glyphosate de *I. grandifolia* pode aumentar ou diminuir em razão do teor de P no solo.

Neste trabalho o controle (100%) de *U. decumbens* com 1080 g ha^{-1} de glyphosate foi observado aos 14 DAA em solo com 14 mg dm^{-3} de P e aos 21 DAA em solo com 180 mg dm^{-3} de P. O menor teor de P pelas plantas em relação a *I. grandifolia* pode estar relacionado ao menor tempo para absorção de P pelas plantas, uma vez que aos 7 DAA foram observados sintomas de clorose e necrose. O aumento dos níveis de fertilização com PO_4^{3-} em solos tratados com glyphosate leva ao aumento da disponibilidade do herbicida para absorção pela raiz e aumentando os efeitos deletérios do glyphosate nas plantas (Bott et al., 2011).

O PO_4^{3-} pode aumentar a absorção de glyphosate pelas raízes em espécies de plantas daninhas e a coaplicação de PO_4^{3-} e glyphosate leva a maior assimilação do herbicida por essas plantas, contribuindo pela eficiência do herbicida (Gomes et al., 2015). Relacionado a isto, o glyphosate pode ter maior absorção e rápida translocação em folhas e raízes de plantas cultivadas na ausência de Pi (Pereira et al., 2019). Essa diferença na absorção do glyphosate entre os meios de cultivo com e sem Pi, são atribuídas aos transportadores de fosfato presentes, já que a expressão dos transportadores de alta afinidade pode aumentar na ausência de Pi (Pereira et al., 2019).

Enfatizamos que a perda da eficácia do glyphosate aplicado via foliar pode ser reduzida quando as plantas são cultivadas em solos com alto teor de Pi e adicionalmente pode contribuir para o aumento da seleção de biótipos resistentes ao glyphosate entre as plantas daninhas (Pereira et al., 2019). Contudo, mais estudos são necessários para compreender melhor a relação do P no solo com o herbicida glyphosate e seus efeitos sobre as cultivares de café e no controle das plantas daninhas, e, para entender a competição de absorção entre o P e o glyphosate nas plantas, uma vez que pode haver resposta diferencial entre espécies e cultivares.

6.2 Respostas antioxidantes e do acúmulo de nutrientes de híbridos de milho submetidos ao glyphosate e fósforo

Os híbridos de milho tiveram diferentes respostas ao crescimento, acúmulo de nutrientes, respostas ao estresse oxidativo e na atividade das enzimas antioxidantes. Os híbridos apesar de serem semelhantes morfologicamente, diferem entre si. O híbrido transgênico contém a tecnologia VT PRO 2 (Agroceres, 2021). Conhecida por possuir duas proteínas inseticidas de Bt que propiciam eficiente controle da lagarta-do-cartucho, da lagarta-da-espiga e broca-do-colmo, além da tolerância ao glyphosate (Agroceres, 2021).

As doses de P e glyphosate influenciaram no acúmulo de massa seca do milho. Os dois híbridos responderam melhor ao cultivo com 2 mmol L^{-1} de P. No entanto, após a aplicação do glyphosate, nota-se que a relação glyphosate e P no milho transgênico cultivado com 2 mmol L^{-1} de P foi favorável para aumento do acúmulo de massa seca, em relação as plantas cultivadas com 0,5 mmol L^{-1} de P. Porém, qualquer produto químico que altere o metabolismo da folha, afeta o nível de intermediários e/ou atividade das enzimas do ciclo de Calvin (Zobiole et al., 2010). Corroborando com isso, além da redução da biomassa em plantas cultivadas 0,5 mmol L^{-1} de P e expostas ao glyphosate, também foi observado em soja RR (tolerante ao glyphosate) menor eficiência no acumulo de massa seca em plantas tratadas com glyphosate, em relação a plantas não expostas ao herbicida (Zobiole et al., 2010).

O acúmulo de nutrientes nos híbridos convencional e transgênico foi influenciado pelos teores de P e pela aplicação de glyphosate. No entando, foi verificado que pode haver diferença na absorção de nutrientes entre os híbridos e que a absorção de nutrientes pode ocorrer mais tarde em híbridos de milho transgênicos (Silva et al., 2018).

O conteúdo de clorofila e de carotenoides foi influenciado pela aplicação de glyphosate. Os carotenoides além da sua função como pigmentos acessórios, desempenham papel na fotoproteção fotossintética, os quais exercem sua função fotoprotetora por meio do rápido *quenching* dos estados excitados da clorofila (Taiz et al., 2016). No entanto, independente da dose de P no cultivo do híbrido convencional, plantas expostas ao herbicida tiveram menor conteúdo de clorofila e carotenoides aos

8 DAA. Corroborando com isso, o conteúdo de clorofila é geralmente afetado pelo glyphosate a partir de 2 DAA, com possível redução do conteúdo de clorofila (Zobiole et al., 2010).

O híbrido convencional, apresentou sinais de intoxicação pelo herbicida e maior estresse oxidativo, ou seja, maior concentração de MDA; isto pode estar relacionado à sensibilidade à exposição de glyphosate e; ao fato de que, aos 8 DAA as folhas deste híbrido apresentavam sinais de intoxicação e lesão em parte dos tecidos foliares. Corroborando com isso, sinais como clorose em folhas é comumente observada em plantas suscetíveis expostas ao herbicida (Buehring; Massey; Reynolds, 2007). Também, após o tratamento com glyphosate e inibição da EPSPS, há geração de EROS (Piasecki et al., 2019). Pois sua ação causa perturbações na maquinaria fotossintética por meio da redução da atividade da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase, dos níveis de ácido 3-fosfoglicérico e do acúmulo de energia, além do bloqueio do transporte de elétrons no fotossistema II, o que leva à superprodução de EROS, dano celular e morte de planta sensível ao glyphosate de 7 a 15 dias após a aplicação (Piasecki et al., 2019).

Apesar de ser tolerante ao glyphosate, o milho transgênico apresentou altas concentrações do conteúdo de MDA tanto em folhas como em raízes. O MDA é o principal produto da peroxidação lipídica, o qual é um indicativo de dano na membrana e estresse oxidativo. Aumento do MDA pode acontecer, quando EROS ou radicais livres, são gerados extra ou intracelularmente, os quais podem exercer seus efeitos tóxicos nas células (Gill; Tuteja, 2010). Apesar da exposição do glyphosate nas folhas, o estresse oxidativo nas raízes pode estar relacionado ao fato de que 74H após a absorção do glyphosate pelas folhas, cerca de 34 a 80% do glyphosate pode ser distribuído para outras folhas e principalmente para as raízes (Cakmak et al., 2009; Li et al., 2005; Smedbol et al., 2019). O acúmulo deste herbicida em raízes já foi observado em plantas de milho (Bernal et al., 2012; Smedbol et al., 2019).

A expressão de SOD e GPOX foram influenciadas pela interação de glyphosate e P. Estas enzimas atuam como eliminadoras de EROS, no qual resulta em tolerância ao estresse abiótico em várias plantas cultivadas devido à capacidade de eliminação eficiente de EROS (Gill; Tuteja, 2010). Sendo que a SOD atua na primeira linha de defesa contra os efeitos tóxicos de níveis elevados de EROS (Gill; Tuteja, 2010;

Gratão et al., 2005; Piasecki et al., 2019) e a GPOX ajuda as células vegetais contra o estresse oxidativo. Mas apesar da atividade destas enzimas em folhas e raízes, não foram suficientes para evitar o estresse oxidativo, principalmente no híbrido convencional. Porém, há relatos de que plantas transgênicas tolerantes ao estresse abiótico apresentem superexpressão de SOD (Gill; Tuteja, 2010) e diminuição da atividade da GPOX nas raízes (Dixit; Pandey; Shyam, 2001).

A investigação de outras enzimas antioxidantes ou do sistema antioxidante não enzimático em resposta a interação entre glyphosate e P, pode fornecer informações uteis sobre os efeitos desta interação.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho concluímos que: (i) As cultivares de café arábica Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho apresentaram tolerância a subdoses de glyphosate e respostas diferenciadas aos teores de P e aplicação de glyphosate no crescimento. (ii) Os teores de P no solo influenciaram teor de P, S, Ca e Mg em Catuaí Amarelo e de P e Ca em Catuaí Vermelho. (iii) A aplicação de 1080 g ha^{-1} de glyphosate foi eficiente no controle de *Urochloa decumbens* e não controlou *Ipomoea grandifolia.* Além disso o nível de tolerância de *I. grandifolia* aumentou conforme aumentou o teor de P no solo. (iv) A interação entre glyphosate e P (2 mmol L^{-1} de P) foi positiva para o acúmulo de nutrientes nos híbridos de milho. (v) O P influenciou de forma positiva a concentração de carotenoides no híbrido convencional submetido ao glyphosate. (vi) O P (2 mmol L^{-1} de P) reduziu a concentração de MDA, induzida pelo glyphosate no híbrido transgênico e regulou a atividade das enzimas antioxidantes. Mas a atividade de SOD e GPOX não foram o suficiente para evitar o estresse oxidativo. (vii) O efeito da interação glyphosate e P nas plantas tende a ser diferente entre espécies, cultivares e condições de cultivos.

8 FINANCIAMENTO

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

9 REFERÊNCIAS

Agroceres (2021). **AG 8061: Produtividade e sanidade foliar, com elevada amplitude de plantio.** Disponível em: <http://www.sementesagroceres.com.br/pages/Produto_AG_8061.aspx>. Acesso em: 02 dez. 2020.

Aguiar AT da E, Gonçalves C, Paterniani MEAGZ, Tucci MLS, Castro CEF de (2014) **Boletim 200: Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 7. ed. Campinas, São Paulo: Instituto Agronômico (IAC).

Alves LR, Reis AR dos, Prado ER, Lavres J, Pompeu GB, Azevedo RA, Gratão PL (2019) New insights into cadmium stressful-conditions: Role of ethylene on selium-mediated antioxidant enzymes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 186: 109747. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109747>

Amarante Junior O de P, Santos TCR, Brito NM, Ribeiro ML (2002) Glyphosate: properties, toxicity, use and legislation. **Química Nova**, 25: 589–593. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000400014>

Andrade, TCGR de (2017) **Impact of herbicides, their relation with phosphate fertilization and effectiveness of weed control in pinus**. 111 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages. Disponível em: < https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1324/Tese_Thiago_Andrade_15675386585115_1324.pdf>

Arshad M, ALI S, Noman A, Ali Q, Rizwan M, Farid M, Irshad MK (2016) Phosphorus amendment decreased cadmium (Cd) uptake and ameliorates chlorophyll contents, gas exchange attributes, antioxidants, and mineral nutrients in wheat (*Triticum aestivum* L.) under Cd stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 62: 533–546. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2015.1064903>

Assis, RT de (2010) **Sources and phosphorus levels in seedlings and coffee production**. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. Disponível em: <http://tot.dti.ufv.br/handle/123456789/5967>. Acesso em: 10 dez. 2020.

Assunção HHT, Campos SFB, Sousa LA, Lemes EM, Zandonadi CHS, Cunha JPAR (2019) Adjuvants plus phytosanitary products and the effects on the physical-chemical properties of the spray liquids. **Bioscience Journal,** 35: 1878-1885. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/BJ-v35n6a2019-46994>

Bernal J, Martin MT, Soto ME, Nozal MJ, Marotti I, Dinelli G, Bernal JL (2021) Development and application of a liquid chromatography–mass spectrometry method to evaluate the glyphosate and aminomethylphosphonic acid dissipation in maize plants after foliar treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 60: 4017–4025. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf3006504>

Borém A, GALVÃO JCC, PIMENTEL MA (2017) **Milho do plantio à Colheita**. Editora UFV. Viçosa. 382p.

Bott S, Tesfamariam T, Kania A, Eman B, Aslan N, Römheld V, Neumann G (2011) Phytotoxicity of glyphosate soil residues re-mobilised by phosphate fertilisation. **Plant and Soil**, 342: 249–263. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11104-010-0689-3>

Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72: 248–254. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3>

Buehring NW, Massey JH, Reynolds DB (2007) Shikimic acid accumulation in field-grown corn (*Zea mays*) following simulated glyphosate drift. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 55: 819–824. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf062624f>

Cakmak I, Yazici A, Tutus Y, Ozturk L (2009) Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, 31: 114–119. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030109000665>

Carvalho FP de, França AC, Lemos VT, Ferreira EA, Santos JB dos, Silva AA da (2013) Photosynthetic activity of coffee after application of glyphosate subdoses. **Acta Scientiarum Agronomy**, 35: 109–115. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v35i1.15440>

Carvalho LB de, Alves PLCA, Duke SO (2013) Hormesis with glyphosate depends on coffee growth stage. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, 85: 813–821. Disponivel em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652013005000027>

Carvalho LB de, Bianco S, Prado R de (2021) Physiological dose-response of coffee (*Coffea arabica* L.) plants to glyphosate depends on growth stage. **Chilean Journal of Agricultural Research**, 72: 182–187. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000200003>

Carvalho SJP de, Damin V, Dias ACR, Yamasaki GM, Christoffoleti PJ (2009) Efficacy and pH of glyphosate spray solutions after the addition of nitrogen fertilizers and the use of CO_2-pressurized sprayer. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 44: 569–575. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000600004>

Carvalho FP, Souza BP, França AC, Ferreira EA, Franco MHR, Kasuya MCM, Ferreira FA (2014) Glyphosate drift affects arbuscular mycorrhizal association in coffee. **Planta Daninha**, 32: 783–789. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582014000400013>

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2021) **Boletim da safra de grãos: 4º Levantamento - Safra 2020/21**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 10 jan. 2021.

Corrêa MLP, Galvão JCC, Fontanetti A, Ferreira LR, Miranda GV (2011) Population dynamics of weeds in maize culture in relation to fertilization and management. **Revista Ciência Agronômica**, 42: 354–363. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902011000200014&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>

Costa YKS da, Freitas FCL de, Silveira HM da, Mendes Nascimento RS, SEDIYAMA CS, Alcántara-de La Cruz R (2020) Herbicide selectivity on macauba seedlings and weed control efficiency. **Industrial Crops and Products**, 154: 112725. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112725>

Costa YKS da, Ribeiro NM, Moura GCO, Oliveira AR, Bianco S, Alcántara-de La Cruz R, Carvalho LB de (2021) Effect of glyphosate and P on the growth and nutrition of *Coffea arabica* cultivars and on weed control. **Scientific Reports,** 11: 8095. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87541-z>

Cunha JPAR da, Alves GS, Marques RS (2017) Surface tension, hydrogen-ion potential and electrical conductivity in spray solutions of plant protection products and adjuvants. **Revista Ciência Agronômica**, 48: 261–270. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20170030.>

Cunha JPAR, Teixeira MM, Coury JR, Ferreira LR (2003) Evaluation of strategies to reduce pesticide spray drift. **Planta Daninha**, 21: 325–332. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582003000200019 >

Cure JR, Rodríguez D, Gutierrez AP, Ponti L (2020) The coffee agroecosystem: bio-economic analysis of coffee berry borer control (*Hypothenemus hampei*). **Scientific Reports**, 10: 12262. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68989-x>

Das K, Roychoudhury A (2014) Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science**, 2: 1866–1875. Disponível em: < https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053 >

Denis MH, Delrot S (1993) Carrier-mediated uptake of glyphosate in broad bean (*Vicia faba*) via a phosphate transporter. **Physiologia Plantarum**, 87: 569–575. Disponível em: < https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1993.tb02508.x>

Dixit V, Pandey V, Shyam R (2001) Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad)1. **Journal of Experimental Botany**, 52: 1101–1109. Disponível em: < https://doi.org/10.1093/jexbot/52.358.1101>

Dominghetti AW, Scalco MS, Guimarães RJ, Silva DRG, Carvalho JPS, Pereira VA (2014) Phosphorus doses and irrigation on nutrition of coffee leaf. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18: 1235–1240. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1235-1240>

Duke SO (2018) The history and current status of glyphosate. **Pest Management Science**, 74: 1027–1034. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.4652>

Elhakem AH, Abd El-Salam MM (2018) Elimination of the Effect of Some Herbicides on the Growth of *Zea mays* and Accumulation in the Soil Using Urea. **Planta Daninha**, 36: 1–11. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582018360100104 >

Faria RM, Barros RE, Tuffi Santos LD (2014) Weed interference on growth and yield of transgenic maize. **Planta Daninha**, 32: 515–520. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582014000300007 >

França AC, Carvalho FP, Fialho CMT, D'Antonino L, Silva AA, Santos JB, Ferreira LR (2013) Simulated glyphosate drift on acaiá and catucaí coffee cultivars. **Planta Daninha**, 31: 443–451. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582013000200023>

França AC, Freitas MAM, D'Antonino L, Fialho CMT, Silva AA, Reis MR, Ronchi CP (2010a) Nutrient content in arabica coffee cultivars subjected to glyphosate drift. **Planta Daninha**, 28: 877–885. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000400021>

França AC, Freitas MAM, Fialho CMT, Silva AA, Reis MR, Galon L, Victoria Filho R (2010b) Growth of arabica coffee cultivars submitted to glyphosate doses. **Planta Daninha**, 28: 599–607. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000300017>

Ghisi N de C, Zuanazzi NR, Fabrin TMC, Oliveira EC (2021) Glyphosate and its toxicology: A scientometric review. **Science of The Total Environment**, 733: 139359. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139359>

Giannopolitis CN, Ries SK (1977) Superoxide Dismutases: I. occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59: 309–314. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4264724>

Gill SS, Tuteja N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 48: 909–930. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>

Giraldeli AL, Silva GS da, Silva AFM, Ghirardello GA, Marco LR de, Victoria Filho R (2019) Efficacy and selectivity of alternative herbicides to glyphosate on maize. **Revista Ceres**, 66: 279–286. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201966040006>

Godoy MC (2007) **Efeitos do glyphosate sobre o crescimento e absorção de fósforo pela soja**. 42f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/86362/godoy_mc_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gomes-Junior RA, Moldes CA, Delite FS, Pompeu GB, Gratão PL, Mazzafera P, Lea PJ, Azevedo RA (2006) Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. **Chemosphere**, 65: 1330–1337. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.04.056>

Gomes MP, Juneau P (2016) Oxidative stress in duckweed (*Lemna minor* L.) induced by glyphosate: Is the mitochondrial electron transport chain a target of this herbicide? **Environmental Pollution**, 218: 402–409. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.019>

Gomes MP, Le Manac'h SG, Maccario S, Labrecque M, Lucotte M, Juneau P (2016a) Differential effects of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) on photosynthesis and chlorophyll metabolism in willow plants. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 130: 65–70. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.11.010>

Gomes MP, Le Manac'h SG, Moingt M, Smedbol E, Paquet S, Labrecque M, Lucotte M, Juneau P (2016b) Impact of phosphate on glyphosate uptake and toxicity in willow. **Journal of Hazardous Materials**, 304: 269–279. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.043>

Gomes MP, Maccario S, Lucotte M, Labrecque M, Juneau P (2015) Consequences of phosphate application on glyphosate uptake by roots: Impacts for environmental management practices. **Science of The Total Environment**, 537: 115–119. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.054>

Gomes MP, Smedbol E, Chalifour A, Hénault-Ethier L, Labrecque M, Lepage L, Lucotte M, Juneau P (2014) Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview. **Journal of Experimental Botany**, 65: 4691–4703. Disponível em: < https://doi.org/10.1093/jxb/eru269>

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LEP, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56: 79–96. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão PL, Polle A, Lea PJ, Azevedo R (2005) A Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, 32: 481. Disponível em: <www.publish.csiro.au/journals/fpb>

Green JM (2007) Review of glyphosate and ALS-inhibiting herbicide crop resistance and resistant weed management. **Weed Technology**, 21: 547–558. Disponível em:< https://doi.org/10.1614/WT-06-004.1>

Heath RL, Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125: 189–198. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1>

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 347p.

Huang Z, Liu Y, Zhang C, Jiang C, Huang H, Wei S (2019) Molecular basis of natural tolerance to glyphosate in *Convolvulus arvensis*. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 8133, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-44583-8>

Jorgensen SS (1977) **Metodologia utilizada para análises químicas de rotina: guia analítico**. Piracicaba, SP, Brasil. 24p.

Kruse ND, Trezzi MM, Vidal RA (2000) Herbicides inhibitors of EPSPs: literature review. **Revista Brasileira de Herbicidas**, 1: 139. Disponível em:< https://www.rbherbicidas.com.br/index.php/rbh/article/view/328/259>

Lacerda AL de S, Victoria Filho R (2004) Dose-response curves in weed species with the use of herbicide glyphosate. **Bragantia**, 63: 73–79. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000100008>

Leino L, Tall T, Helander M, Saloniemi I, Saikkonen K, Ruuskanen S, Puigbò P (2021) Classification of the glyphosate target enzyme (5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase) for assessing sensitivity of organisms to the herbicide. **Journal of Hazardous Materials**, 408: 12455615. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124556>

Li J, Smeda RJ, Sellers BA, Johnson WG (2005) Influence of formulation and glyphosate salt on absorption and translocation in three annual weeds. **Weed Science**, 53: 153–159. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0043174500022621/type/journal_article>

Li P, He S, Tang T, Qian K, Ni H, Cao Y (2012) Evaluation of the efficacy of glyphosate plus urea phosphate in the greenhouse and the field. **Pest Management Science**, 68: 170–177. Disponível em:< https://doi.org/10.1002/ps.2240>

Lichtenthaler H K (1987) [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**. 148: 350–382. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1>

Malavolta E (2006) **Manual de nutrição mineral de plantas.** Ceres. 631p.

Manikandan R, Ezhili N, Venkatachalam P (2016) Phosphorus Supplementation Alleviation of the Cadmium-Induced Toxicity by Modulating Oxidative Stress Mechanisms in Vetiver Grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty]. **Journal of Environmental Engineering**, 142: 1–10. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001112>

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2020) Sumário executivo: Café. Março-2020. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, 2020. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_estatistico/Sumario_Cafe_Marco_2020.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.

Maroli AS, Nandula VK, Dayan FE, Duke SO, Gerard P, Tharayil N (2015) Metabolic Profiling and Enzyme Analyses Indicate a Potential Role of Antioxidant Systems in Complementing Glyphosate Resistance in an *Amaranthus palmeri* Biotype. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 63: 9199–9209. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.5b04223>

Matiello JB (2008) **Ervas daninhas trepadeiras, duplamente prejudiciais em cafezais**. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/4677/doc_08_34-CBPC-2008.pdf?sequence=1>. Acesso em: 01 dez. 2020.

Matiello JB (2020) Ocorrência de ferrugem atacando a erva corda de viola sobre cafeeiros. **Café Point**, 2020. Disponível em: <https://www.cafepoint.com.br/noticias/tecnicas-de-producao/ocorrencia-de-ferrugem-atacando-a-erva-corda-de-viola-sobre-cafeeiros-219258/>

Mehrabi Z, Lashermes P (2017) Protecting the origins of coffee to safeguard its future. **Nature Plants**, 3: 16209. Disponível em:< https://doi.org/10.1038/nplants.2016.209>

Miller G, Suzuki N, Ciftci-Yilmaz S, Mittler R (2010) Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell and Environment**. 33: 453-467. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>

Monquero PA, Christoffoleti PJ, Osuna MD, Prado RA (2004) Absorption, translocation and metabolism of glyphosate by plants tolerant and susceptible to this herbicide. **Planta Daninha**, 22: 445–451. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000300015 >

Muñoz JP, Bleak TC, Calaf GM (2021) Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. **Chemosphere**, 270: 128619. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128619>

Neto AP, Favarin JL, Hammond JP, Tezotto T, Couto HTZ (2016) Analysis of phosphorus use efficiency traits in coffea genotypes reveals *Coffea arabica* and *Coffea canephora* have contrasting phosphorus uptake and utilization efficiencies. **Frontiers in Plant Science**, 7: 1–10. Disponível em:< https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00408>

Novais RF, Smyt, TJ (1999) **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV/DPS, 399p

Oliveira Jr RS (2011) Mecanismos de Ação de Herbicidas. In: **Biologia e Manejo de plantas Daninhas**. 141–191p. Disponível em:< http://omnipax.com.br/livros/2011/BMPD/BMPD-cap7.pdf>

Peloso A de F, TATAGIBA SD, REIS EF, PEZZOPANE JEM, AMARAL JFT (2017) Photosynthetic limitations in leaves of Arabic coffee promoted by the water deficit. **Coffee Science**, 12: 389–399. Disponível em:< http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1314/pdf_1314 >

Pereira, FCM (2016) **Efeitos do glyphosate e do fósforo em eucalipto**. 183 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal. Disponível em:< https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/141525/pereira_fcm_dr_jabo.pdf ?sequence=5>

Pereira FCM, Tayengwa R, Alves PLDCA, Peer WA (2019) Phosphate status affects phosphate transporter expression and glyphosate uptake and transport in grand eucalyptus (*Eucalyptus grandis*). **Weed Science**, 67: 29–40. Disponível em:< https://doi.org/10.1017/wsc.2018.58>

Piasecki C, Carvalho IR, Cechin J, Goulart FAP, Carlos L, Agostinetto D, Caverzan A Jr CNS, Vargas L (2019) Oxidative stress and differential antioxidant enzyme activity in glyphosate-resistant and -sensitive hairy fleabane in response to glyphosate treatment. **Bragantia**, 78: 379–396. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.20180289 %0A>

Prado R de M, Fernandes FM (2001) Economic aspects of phosphorus application to the corn crop. **Scientia Agricola**, 58: 617–621. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162001000300027&lng=pt&tlng=pt>

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agronômico de Campinas, 285p.

Ragassi CF, Pedrosa AW, Favarin JL (2013) Aspectos positivos e riscos no consórcio cafeeiro e braquiária. **Revista Visão Agrícola**, 12: 29–32. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va12-instalacao-da-lavoura05.pdf>

Ramires AC, Constantin J, Oliveira Jr RS, Guerra N, Alonso DG, Biffe DF (2010) Control of *Euphorbia heterophylla* and *Ipomoea grandifolia* using glyphosate isolated or in association with broadleaf herbicides. **Planta Daninha**, 28: 621–629. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000300020 >

Reddy KRN, Rimando AGM, Duke STO, Nandula VIK (2008) Aminomethylphosphonic acid accumulation in plant species treated with glyphosate. **Journal of agricultural and food chemistry**, 56: 2125–2130. Disponível em: < https://doi.org/10.1021/jf072954f>

Reis LAC, Carvalho FP, França AC, Francino DMT, Pinto NAVD, Freitas AF (2018) Leaf morphoanatomy and biochemical variation on coffee cultivars under drift simulation of glyphosate. **Planta Daninha**, 36: e018143560 Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582018360100149>

Reis THP, Neto AEF, Guimarães PTG, Guerra AF, Oliveira CHC (2013) Estado nutricional e frações foliares de P no cafeeiro em função da adubação fosfatada. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 48: 765–773. Disponível em:< https://www.scielo.br/pdf/pab/v48n7/09.pdf>

Rodrigues GJ, Teixeira MM, Ferreira LR, Fernandes HC (2003) Efficiency of a sprayer boom for herbicide application in young coffee crops. **Planta Daninha**, 21: 459–465. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582003000300015>

Ronchi CP, Silva AA (2003) Tolerance of coffee plants to post emergence herbicide application. **Planta Daninha**, 21: 421–426. Disponível em:< http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582003000300010>

Ronchi CP, Silva AA (2004) Weed control in young coffee plantations through post emergence herbicide application onto total area. **Planta Daninha**, 22: 607–615. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582004000400016>

Sakiyama N, Martinez H, Tomaz M, Borém A (2015) **Café Arábica: Do Plantio a Colheita**. Editora UF ed. Viçosa. 316p.

Santos CAM dos, Santos RT da S, Della'vechia JF, Griesang F, Polanczyk RA, Ferreira M da C (2019) Effect of addition of adjuvants on physical and chemical characteristics of Bt bioinsecticide mixture. **Scientific Reports**, 9: 12525. Disponível em:< https://doi.org/10.1038/s41598-019-48939-y>

Santos MA De P, Botega BL, Guedes AJL, Oliveira JCD de (2021) **Manejo do capim braquiária como planta de cobertura em cafeeiros**. Disponível em: <http://coopercam.com.br/noticias/selecionada/BRAQUIARIA_COBERTURA_CAFEEIRO>. Acesso em: 18 jan. 2021.

Sarruge JR, Haag HP (1974) Análises químicas em plantas. **Piracicaba:ESALQ/USP**, Piracicaba, SP, Brazil, 56p.

Sasal MC, Demontes L, Cislaghi A, Gabioud EA, Oszust JD, Wilson MG, Michlig N, Beldoménico HR, Repetti MD (2015) Glyphosate loss by runoff and its relationship with phosphorus fertilization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 63: 4444-4448. Disponível em: < https://doi.org/10.1021/jf505533r>

Scalco MS, Alvarenga LA, Guimarães RJ, Dominghetti AW, Colombo A, Assis GA, Abreu GF (2014) Leaf contents of phosphorus and zinc, productivity, and growth of irrigated coffee. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 49: 95–101. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000200003>

Schonbrunn E, Eschenburg S, Shuttleworth WA, Schloss JV, Amrhein N, Evans JNS, Kabsch W (2001) Interaction of the herbicide glyphosate with its target enzyme 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate synthase in atomic detail. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 98: 1376–1380. Disponível em: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.98.4.1376>

Schrübbers LC, Valverde BE, Sørensen JC, Cedergreen N (2014) Glyphosate spray drift in *Coffea arabica* - Sensitivity of coffee plants and possible use of shikimic acid as a biomarker for glyphosate exposure. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 115: 15–22. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.08.003>

Sidhu RS, Hammond BG, Fuchs RL, Mutz J-N, Holden LR George B, Olson T (2000) Glyphosate-tolerant corn: the composition and feeding value of grain from glyphosate-tolerant corn is equivalent to that of conventional corn (*Zea mays* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 48: 2305–2312. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf000172f>

Silva AFM, Albrecht AJP, Giovanelli BF, Ghirardello GA, Damião VW, Albrecht LP, Victória Filho R (2017) Seletividade de herbicidas isolados e em associações para milho RR2/LL®. **Revista Brasileira de Herbicidas**, 16: 60. Disponível em: <http://www.rbherbicidas.com.br/index.php/rbh/article/view/509>

Silva CGM, Resende ÁV, Gutiérrez AM, Moreira SG, Borghi E, Almeida GO (2018) Macronutrient uptake and export in transgenic corn under two levels of fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 53: 1363–1372. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200009>

Silva MR, Galon L, Rossetto ER de O, Silva AF, Favretto E, Brunetto L, Gallina A, Silva AML, Tonin RJ (2020) Weed management in glyphosate-resistant maize. **Arquivos do Instituto Biológico**, 87: 1–9. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/1808-1657000862019>

Silva VCZ, Santos RF, Werncke I, Souza SNM, Nogueira CCEC, Vidal TC (2012) Fósforo na cultura do Café *Coffea arabica*. **Acta Iguazu**, 1: 64–70. Disponível em:< https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v1i3.7123>

Smedbol É, Lucotte M, Maccario S, Gomes MP, Paquet S, Moingt M, Mercier LLC, Sobarzo MRP, Blouin M-A (2019) Glyphosate and aminomethylphosphonic acid content in glyphosate-resistant soybean leaves, stems, and roots and associated phytotoxicity following a single glyphosate-based herbicide application. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 67: 6133–6142. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jafc.9b00949>

Souza LS, Losasso PHL, Oshiiwa M, Garcia RR, Goes Filho LA (2006) Effect of *Brachiaria decumbens* control bands on the initial development and productivity of *Coffea arabica*. **Planta Daninha**, 24: 715–720. Disponível em: < https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000400012>

Sytykiewicz H (2014) Differential Expression of Superoxide Dismutase Genes in Aphid-Stressed Maize (*Zea mays* L.) Seedlings. **PLoS ONE**, 9: e94847. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0094847>

Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A (2016) **Fisiologia e desenvolvimento vegetal diversidade vegetal**. 6. ed. 888p.

Tomaz MA, Martinez HEP, Cruz CD, Freitas RS, Pereira AA, Sakiyama NS (2009) Efficiency of absorption and use of nitrogen, phosphorus and sulphur on grafted coffee plants cultivated in pots. **Ciência e Agrotecnologia**, 33: 993–1001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000400008>

Tzin V, Galili G (2010) New insights into the shikimate and aromatic amino acids biosynthesis pathways in plants. **Molecular Plant**, 3: 956–972. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mp/ssq048>

Vitti GC (1989) **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta**. 1. ed. Jaboticabal, SP.

Werlang RC, Ferreira LR, Silva AA (2002) Effect of the sequential application of glyphosate in *Commelina benghalensis* and *Commelina diffusa* control in coffee crop. **Revista Brasileira de Herbicidas**, 3: 33. Disponível em:< https://doi.org/10.7824/rbh.v3i1.369>

Withers PJA, Rodrigues M, Soltangheisi A, Carvalho TS, Guilherme LRG, Benites V De M, Gatiboni LC, Sousa DMG, Nunes RDS, Rosolem CA, Andreote FD, Oliveira A, Coutinho ELM, Pavinato PS (2018) Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, 8: 2537. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>

Zhong G, Wu Z, Liu N, Yin J (2018) Phosphate alleviation of glyphosate-induced toxicity in *Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer. **Aquatic Toxicology**, 201: 91–98. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.05.025>

Zobiole LHS De, Oliveira RS, Kremer RJ, Constantin J, Bonato CM, Muniz AS (2010) Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. **Pesticide Biochemistry and Physiology**,97: 182-193. Disponível em:< https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2010.01.004>