

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

BRASSINOSTEROIDE E SILÍCIO NAS CULTURAS DO
MILHO E SORGO

Autora: Larissa Pacheco Borges
Orientador: Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva

Rio Verde - GO
Março - 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

BRASSINOSTEROIDE E SILÍCIO NAS CULTURAS DO
MILHO E SORGO

Autora: Larissa Pacheco Borges
Orientador: Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva

Tese apresentada, como parte das exigências para a obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde.

Rio Verde - GO
Março – 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

B732b Borges, Larissa Pacheco
 Brassinosteroide e silício nas culturas do milho e
 sorgo / Larissa Pacheco Borges; orientador Alessandro
 Guerra da Silva. -- Rio Verde, 2018.
 108 p.

 Tese (Doutorado em Programa de Pós-graduação em
 Ciências Agrárias, Agronomia) -- Instituto Federal
 Goiano, Câmpus Rio Verde, 2018.

 1. Estresse. 2. Produtividade. 3. Regulador de
 crescimento. 4. Sorghum bicolor. 5. Zea mays. I.
 Guerra da Silva, Alessandro , orient. II. Título.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS - AGRONOMIA**

**BRASSINOSTEROIDE E SILÍCIO NAS CULTURAS DO MILHO E
SORGO**

Autora: Larissa Pacheco Borges
Orientador: Dr. Alessandro Guerra da Silva

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 09 de março de 2018.

Prof. Dr. Fábio Santos Matos
Avaliador externo
UEG– Campus Ipameri/GO

Prof. Dr. Itamar Rosa Teixeira
Avaliador externo
UEG – Anápolis/GO

Prof. Dr. Guilherme Braga Pereira Braz
Avaliador externo
UniRV – Rio Verde/GO

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira
Avaliador interno
IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, força e oportunidades.

Aos meus pais, pelo amor eterno, exemplos de sabedoria, paciência, dedicação, perseverança, incentivo e por sempre acreditarem em mim.

Ao meu querido amor Hilton Junior, que me ajudou, durante todo o percurso de minha vida acadêmica e profissional e sempre esteve ao meu lado me dando força, apoio e acreditando na minha capacidade de vencer.

A minha querida irmã, pelo carinho, paciência, incentivo, por sempre acreditar em mim e permanecer ao meu lado, nos bons e maus momentos.

A toda minha família, pelo carinho e incentivo.

Ao meu orientador Professor Alessandro Guerra da Silva, exemplo de dedicação, pela orientação, ensinamentos e oportunidades oferecidas. Obrigada pela confiança, apoio e pela amizade durante todos os anos de convívio.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, pela oportunidade de realização doutorado.

À Universidade Estadual de Goiás – Campus Ipameri, em especial ao professor Fábio Santos Matos, por ter cedido o laboratório de Fisiologia Vegetal, para que fosse possível a realização das análises.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, por terem cedido o espaço do laboratório para a realização de algumas etapas das análises bioquímicas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao meu coorientador Professor Fábio Santos Matos, que contribuiu muito para o meu crescimento profissional, nunca medindo esforços para me ajudar. Foi meu orientador de mestrado e continuou me ajudando durante o doutorado. É a pessoa em

que eu me inspiro desde quando conheci, pela competência, eficiência, sabedoria, comprometimento e exemplo profissional.

Ao meu coorientador Professor Eduardo da Costa Severiano, pela orientação, apoio e ensinamentos.

A todos os amigos que contribuíram para a execução do meu projeto e cuja participação foi fundamental para a realização deste trabalho. Em especial ao Hilton Junior, José Paulo, Ivan, Anderson, Luiz Felipe, Fernanda, Bruno, Paulo Henrique, Gabriel e Muriel. Pela amizade, enorme companheirismo e imensa dedicação.

As secretárias do Instituto Federal Goiano, em especial a Vanilda, pela amizade, dedicação, competência e profissionalismo que sempre empenham em seus trabalhos e, aos demais que trabalham nas secretarias da pós-graduação pela amizade e competência.

A todos meus colegas e amigos de pós-graduação do Instituto Federal Goiano, pela amizade, companheirismo e pelo compartilhamento de conhecimentos.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias-Agronomia, pela dedicação e ensinamentos repassados.

A todos aqueles que acreditaram em mim e que direta ou indiretamente, contribuíram para esta imensa felicidade que estou sentindo nesse momento.

A todos vocês, meu muito obrigada!

BIOGRAFIA DA AUTORA

LARISSA PACHECO BORGES, filha de Shirley Rita Pacheco Borges e Guilherme Orlando Borges, nasceu no dia 02 de janeiro de 1987, na cidade de Ipameri, Goiás.

Em fevereiro de 2005, ingressou no curso de Agronomia na Universidade Estadual de Goiás, Campus Ipameri - Goiás, graduando em agosto de 2009.

Em fevereiro de 2012, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, na Universidade Estadual de Goiás – Campus de Ipameri, sob a orientação do Professor Fábio Santos Matos, concluindo em fevereiro de 2014.

Em março de 2014, iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde, sob a orientação do Professor Alessandro Guerra da Silva.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
2. OBJETIVO	11
2.1. Geral.....	11
2.2. Específicos	11
3. CAPÍTULO I	12
BRASSINOLÍDEO E SILÍCIO NA CULTURA DO MILHO	12
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
3.1 Introdução	14
3.2 Materiais e métodos	16
3.2.1 Informações gerais	16
3.2.2 Delineamento experimental.....	17
3.2.3 Monitoramento da umidade do solo	19
3.2.4 Variáveis fisiológicas.....	19
3.2.5 Variáveis bioquímicas	19
3.2.6 Variáveis morfológicas	21

3.2.7 Severidade de doenças e danos de pragas.....	21
3.2.8 Teor de silício e nitrogênio na planta.....	21
3.2.9 Componentes de produtividade.....	22
3.2.10 Análise econômica.....	22
3.2.11 Análises estatísticas.....	22
3.3 Resultados.....	22
3.3.1 Experimento milho em 2015.....	22
3.3.1.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e doenças.....	22
3.3.1.2 Componentes de rendimento.....	24
3.3.1.3 Variáveis fisiológicas.....	26
3.3.1.4 Variáveis bioquímicas.....	28
3.3.2 Experimento milho em 2016.....	29
3.3.2.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e doenças.....	29
3.3.2.2 Componentes de rendimento.....	32
3.3.2.3 Variáveis fisiológicas.....	34
3.3.2.4 Variáveis bioquímicas.....	36
3.4 Discussão.....	39
3.5 Conclusões.....	45
3.6 Referências Bibliográficas.....	45
4. CAPÍTULO II.....	51
BRASSINOLÍDEO E SILÍCIO NA CULTURA DO SORGO GRANÍFERO.....	51
RESUMO.....	51
ABSTRACT.....	52
4.1 Introdução.....	53
4.2 Materiais e métodos.....	54
4.2.1 Informações gerais.....	54
4.2.2 Delineamento experimental.....	56
4.2.3 Monitoramento da umidade do solo.....	57
4.2.4 Variáveis fisiológicas.....	58
4.2.5 Variáveis bioquímicas.....	58
4.2.6 Variáveis morfológicas.....	60
4.2.7 Severidade de doenças e danos de pragas.....	60
4.2.8 Teor de silício e nitrogênio na planta.....	60
4.2.9 Componentes de produtividade.....	61

4.2.10 Análise econômica	61
4.2.11 Análises estatísticas	61
4.3 Resultados	61
4.3.1 Experimento sorgo em 2015.....	61
4.3.1.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e sever. de doenças... 61	
4.3.1.2 Componentes de rendimento.....	63
4.3.1.3 Variáveis fisiológicas.....	65
4.3.1.4 Variáveis bioquímicas.....	67
4.3.2 Experimento sorgo em 2016.....	69
4.3.2.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e sever. de doenças... 69	
4.3.2.2 Componentes de rendimento.....	71
4.3.2.3 Variáveis fisiológicas.....	73
4.3.2.4 Variáveis bioquímicas.....	74
4.4 Discussão	76
4.5 Conclusão.....	81
4.6 Referências bibliográficas.....	81
5. CONCLUSÃO GERAL.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	12
Tabela 1. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP) e de inserção da espiga (AIE), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF) e área foliar específica (AFE) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	23
Tabela 2. Significâncias e valores médios das variáveis de teor relativo de água (TRA), massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	24
Tabela 3. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/espiga (NGE), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), peso de grãos por espiga (PGE), comprimento da espiga (CE), peso de mil grãos (PMG), da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	25
Tabela 4. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de espigas (NE), percentual de grãos ardidos (GA), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do milho safrinha em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	26
Tabela 5. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila <i>a</i> (Cl <i>a</i>), clorofila <i>b</i> (Cl <i>b</i>), carotenoides (Car), clorofila total (Cl _t) e índice de feofitinação (IF) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	27
Tabela 6. Significâncias e valores médios das variáveis açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT), taxa de liberação de eletrólitos (TLE) e malondialdeído (MDA) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	28
Tabela 7. Significâncias e valores médios das variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	29

Tabela 8. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP) e de inserção da espiga (AIE), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF) e área foliar específica (AFE) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....30

Tabela 9. Significâncias e valores médios das variáveis de teor relativo de água (TRA), massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....31

Tabela 10. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/espiga (NGE), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), peso de grãos por espiga (PGE), comprimento da espiga (CE), peso de mil grãos (PMG), da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....33

Tabela 11. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de espigas (NE), percentual de grãos ardidos (GA), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....33

Tabela 12. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....35

Tabela 13. Significâncias e valores médios das variáveis açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT), taxa de liberação de eletrólitos (TLE) e malondialdeído (MDA) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....37

Tabela 14. Significâncias e valores médios das variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....38

CAPÍTULO II..... 51

Tabela 1. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), área foliar específica (AFE) e teor relativo de água (TRA) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....62

Tabela 2. Significâncias e valores médios das variáveis massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....62

Tabela 3. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/panícula (NGP), peso de grãos/panícula (PGP), comprimento da panícula (CP) e peso de mil

grãos (PMG) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....64

Tabela 4. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de panículas (NP), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....64

Tabela 5. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila a (Cl *a*), clorofila b (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....66

Tabela 6. Significâncias e valores médios das variáveis de açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT) e taxa de liberação de eletrólitos (TLE) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....67

Tabela 7. Significâncias e valores médios das variáveis malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....68

Tabela 8. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), área foliar específica (AFE) e teor relativo de água (TRA) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....69

Tabela 9. Significâncias e valores médios das variáveis massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....70

Tabela 10. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/panícula (NGP), peso de grãos/panícula (PGP), comprimento da panícula (CP) e peso de mil grãos (PMG) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....71

Tabela 11. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de panículas (NP), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....72

Tabela 12. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila a (Cl *a*), clorofila b (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....73

Tabela 13. Significâncias e valores médios das variáveis de açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT) e taxa de liberação de

eletrólitos (TLE) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....75

Tabela 14. Significâncias e valores médios das variáveis malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I	12
Figura 1. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro a julho de 2015, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).....	16
Figura 2. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro a julho de 2016, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).....	16
Figura 3. Regressões ajustadas para as variáveis massa fresca de plantas, nitrogênio e severidade de doenças (Figuras 3A, 3B e 3C, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	24
Figura 4. Regressões ajustadas para as variáveis peso de grãos por espiga, peso de mil grãos e produtividade (Figuras 4A, 4B e 4C, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	26
Figura 5. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila <i>a</i> , clorofila <i>b</i> , clorofila total e carotenoide (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO.....	27
Figura 6. Regressões ajustadas para as variáveis proteína, catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	29
Figura 7. Regressões ajustadas para as variáveis altura de plantas, altura de inserção da espiga, diâmetro do colmo e número de folhas (Figuras 7A, 7B, 7C e 7D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	31

Figura 8. Regressões ajustadas para as variáveis TRA, massa fresca de plantas, massa seca de plantas, nitrogênio, notas de danos de pragas e severidade de doenças (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D, 8E e 8F, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	32
Figura 9. Regressões ajustadas para as variáveis número de grãos por espiga, peso de grãos por espiga, peso de mil grãos, produção e índice de colheita (Figuras 9A, 9B, 9C, 9D e 9E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	34
Figura 10. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila <i>a</i> , clorofila <i>b</i> , clorofila total, carotenoide e índice de feofitinação (Figuras 10A, 10B, 10C, 10D e 10E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	36
Figura 11. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, amido, proteína, malondialdeído e taxa de liberação de eletrólitos (Figuras 11A, 11B, 11C, 11D e 11E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	38
Figura 12. Regressões ajustadas para as variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) (Figuras 12A, 12B, 12C e 12D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....	39
CAPITULO II.....	51
Figura 1. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro de 2015 a julho de 2015, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).....	55
Figura 2. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro de 2016 a julho de 2016, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).....	55
Figura 3. Regressões ajustadas para as variáveis altura de plantas e nitrogênio (Figuras 3A e 3B, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	63
Figura 4. Regressões ajustadas para as variáveis peso de grãos por panícula, peso de mil grãos e produtividade (Figuras 4A, 4B e 4C, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....	65
Figura 5. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila <i>a</i> , clorofila <i>b</i> , carotenoide e clorofila total (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO.....	66

- Figura 6. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD) e superóxido dismutase (SOD) (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.....68
- Figura 7. Regressões ajustadas para as variáveis altura de planta, teor relativo de água (TRA), massa fresca de plantas, massa seca de plantas, nitrogênio e notas de danos de pragas (Figuras 7A, 7B, 7C, 7D, 7E e 7F, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....70
- Figura 8. Regressões ajustadas para as variáveis número de grãos por panícula, peso de grãos por panícula, comprimento da panícula, peso de mil grãos, produtividade e índice de colheita (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D, 8E e 8F, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....72
- Figura 9. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila a, carotenoide e clorofila total (Figuras 9A, 9B e 9C, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....74
- Figura 10. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, amido, proteína, taxa de liberação de eletrólitos (TLE), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD) e superóxido dismutase (SOD) (Figuras 10A, 10B, 10C, 10D, 10E, 10F, 10G e 10H, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.....76

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E UNIDADES

AF	Área foliar	cm ²
AFE	Área foliar específica	cm ² g ⁻¹
AM	Amido	%
AP	Altura da planta	m ou cm
APX	Ascorbato peroxidase	umol ascorbato min ⁻¹ mg ⁻¹ prot
AR	Açúcares redutores	%
AST	Açúcares solúveis totais	%
BL	Brassinolídeo	
BR	Brassinosteroide	
Car	Carotenoide	µg mL ⁻¹
CAT	Catalase	nmol mg ⁻¹ prot
CE	Comprimento da espiga	cm
<i>Cl a</i>	Clorofila a	µg mL ⁻¹
<i>Cl b</i>	Clorofila b	µg mL ⁻¹
<i>Cl t</i>	Clorofila total	µg mL ⁻¹
CO ₂	Dióxido de carbono	
CP	Comprimento da panícula	cm
DAE	Dias após a emergência	
DC	Diâmetro do colmo	mm
DMSO	Dimetilsulfóxido	
DP	Danos de pragas	
EF	Estande final de plantas	pls ha ⁻¹
EROs	Espécies reativas de oxigênio	
g e.a	Gramas de equivalente ácido	
GA	Percentual de grãos ardidos	%
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio	
IC	Índice de colheita	kg pl ⁻¹
MDA	Malonaldeído	mmol g ⁻¹ massa fresca
N	Nitrogênio	g kg ⁻¹
NF	Número de folhas	

NFE	Número de fileiras por espiga	
NGE	Número de grãos por espiga	
NGF	Número de grãos por fileira	
NGP	Número de grãos por panícula	
NP	Número de panículas	
MF	Massa fresca da planta	kg
PGE	Peso de grãos por espiga	g
PGP	Peso de grãos por panícula	g
PMG	Peso de mil grãos	g
POD	Peroxidase do guaiacol	$\mu\text{mol tetraguaicol min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{prot}$
PROD	Produtividade	kg ha^{-1}
PROT	Proteína	mg mL^{-1}
MS	Massa seca da planta	kg
SD	Severidade de doenças	
Si	Silício	mg kg^{-1}
SOD	Superóxido dismutase	$\text{U mg}^{-1} \text{prot}$
TBA	Ácido tiobarbitúrico	
TCA	Ácido tricloroacético	
TLE	Taxa de liberação de eletrólitos	%
TRA	Teor relativo de água	%

RESUMO

BORGES, LARISSA PACHECO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, março de 2018. **Brassinosteroide e silício nas culturas do milho e sorgo**. Orientador: Dsc. Alessandro Guerra da Silva. Coorientadores: Dsc. Eduardo da Costa Severiano e Dsc. Fábio Santos Matos.

A restrição hídrica é o componente climático mais limitante ao desenvolvimento das culturas de segunda safra (safrinha). Para aumentar o rendimento agrícola em condições adversas do ambiente, é desejável adotar técnicas que proporcionem maior tolerância das plantas a essas condições. Sendo assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos do brassinolídeo e do silício no milho e sorgo, cultivados na safrinha. Foram implantados dois experimentos em 2015 e 2016, após a colheita da soja precoce com o uso dos seguintes cultivares: milho (P30S31), sorgo (AG1060). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial 5x2 referentes a cinco doses do brassinolídeo (0,000; 0,050; 0,100; 0,150 e 0,200 mg L⁻¹) e duas condições de uso de silício (sem e com). Para avaliar o efeito da aplicação de brassinolídeo e silício nas culturas, foram analisadas as variáveis morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e agrônômicas, além da severidade de doenças e pragas. A aplicação de brassinolídeo atenuou parcialmente os efeitos prejudiciais da deficiência hídrica nas plantas de milho e sorgo. As plantas foram capazes de responder as condições adversas do meio ambiente, geralmente promovidos pela seca, à infecções por patógenos, alterando os processos fisiológicos e bioquímicos, melhorando o sistema de defesa das plantas catalisados pelos antioxidantes enzimáticos. As doses que proporcionaram maiores produtividades na cultura do milho e sorgo foram de 0,149 e

0,200 mg L⁻¹ sob elevada precipitação pluviométrica, respectivamente, e de 0,134 e 0,193 mg L⁻¹ sob ocorrência de deficiência hídrica, respectivamente. O Si proporcionou menores danos de pragas e severidade de doenças em ambas as culturas. Em situação de deficiência hídrica o Si proporcionou maior acúmulo de água nos tecidos das plantas de milho e sorgo, diminuindo os danos metabólicos nas células e aumentando a produtividade das culturas. Com isto, BL e Si abrem novas abordagens para a tolerância das plantas as condições adversas do meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVES: Estresse, produtividade, regulador de crescimento, *Sorghum bicolor*, *Zea mays*.

ABSTRACT

BORGES, LARISSA PACHECO, Goiano Instituto Federal– Rio Verde Campus– GO, March 2018. **Brassinosteroids and silicon in maize and sorghum crops**. Advisor: Dsc. Alessandro Guerra da Silva. Co-advisors: Dsc. Eduardo da Costa Severiano and Dsc. Fábio Santos Matos.

The water restriction is the more limiting climatic component to the crop development of the second crop (off-season). To increase agricultural yield under adverse environmental conditions, it is desirable to adopt techniques that provide greater tolerance of the plants to these conditions. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effects of brassinolide (BL) and silicon (Si) on maize and sorghum, grown in the off-season. Two experiments were carried out in the off-season of 2015 and 2016, after harvesting the early soybean using the following cultivars: maize (P30S31), sorghum (AG1060). The used experimental design was randomized blocks in a 5x2 factorial scheme with five BL doses (0.000, 0.050, 0.100, 0.150 and 0.200 mg L⁻¹) and two Si (without and with) conditions. The morphological, physiological, biochemical, nutritional and agronomic characteristics and the severity of diseases and pests were analyzed to evaluate the effect of brassinolide and silicon on the cultures. The BL application partially attenuated the damaging effects of water deficiency on maize and sorghum plants. The plants were able to respond to adverse environmental conditions, usually promoted by drought, to pathogen infections, altering the physiological and biochemical processes, improving the defense system of plants catalyzed by enzymatic antioxidants. The concentrations that provided the highest yields in maize and sorghum were respectively 0.149 and 0.200 mg L⁻¹ with high rainfall, and 0.134 and 0.193 mg L⁻¹

¹ in the occurrence of water deficiency, respectively. The Si provided lower pest damage and disease severity in both crops. In situation of water deficiency Si provides a higher water accumulation in the tissues of maize and sorghum plants, reducing the metabolic damages in the cells and increasing the crops productivity. With this, BL and Si open new approaches to plant tolerance to adverse environmental conditions.

KEY WORDS: Stress, Productivity, Growth regulator, *Sorghum bicolor*, *Zea mays*.

1. INTRODUÇÃO

A maior demanda por alimentos aliada a possibilidade de utilização mais racional dos fatores de produção como solo, máquinas, equipamentos e mão de obra, em um período ocioso do ano, tornou possível o cultivo em sucessão (após a colheita da soja precoce), época que é denominada segunda safra ou safrinha. Entre as alternativas econômicas para o cultivo em segunda safra estão as culturas do milho (*Zea mays* L.) (Possamai et al., 2001) e o sorgo (*Sorghum bicolor* L.) (Alvarenga et al., 2001).

O milho é um dos cereais mais cultivados em grande parte do mundo. Seus grãos são amplamente utilizados como matéria-prima para produção de centenas de produtos, além de serem destinados a alimentação humana e animal (Adiaha et al., 2016). Além disso, o cereal representa 80% da participação do mercado global de grãos sendo produzido em 184 milhões de hectares (USDA, 2018). A estimativa é de que a demanda seja dobrada até 2050, tornando-se a cultura com a maior produção global até 2025 (Rosegrant et al., 2001). No Brasil, o milho ocupa a terceira posição de área cultivada com 5,38 milhões de hectares na primeira safra, e 10,63 milhões de hectares na segunda safra ou safrinha (Conab, 2017) com projeções de acréscimo de 7,8% até 2027 (Mapa, 2017).

É crescente a importância do cultivo do milho safrinha no cenário agropecuário nacional. Este cereal tem deixado de ser cultivado na safra de verão, devido ao cultivo de soja, passando a ser semeado em sucessão, tornando-se mais uma alternativa econômica na safrinha (Fornasier Filho, 2007). Além do milho, o sorgo granífero apresenta amplo potencial para uso nos cultivos de safrinha, permitindo maior amplitude da época de semeadura, possibilitando maior flexibilidade na implantação da lavoura (Tardin et al., 2013).

O sorgo é o quinto cereal mais cultivado do mundo. Porém, no Brasil a ascensão da cultura ocorreu a partir de 1990, tendo o Centro-Oeste como principal região produtora (Andrade Neto et al., 2010). São aproximadamente 628,5 mil hectares de área cultivada no Brasil podendo oscilar muito, pela concorrência com o milho nos cultivos de safrinha (Conab, 2017). Mesmo assim, a expectativa é de aumento de área cultivada para os próximos anos, por ser um grão muito versátil, de utilização na alimentação humana e animal (Mapa, 2017).

O sorgo pode substituir parcialmente o milho nas rações para aves e suínos e totalmente para ruminantes, com a vantagem de requerer menor custo de produção e valor de comercialização equivalente a 80% do preço do milho (Duarte, 2012). A importância do sorgo granífero tem se acentuado também, pela capacidade de alta produção e qualidade de grãos em condições de estresse, sendo boa alternativa para safrinha, após o cultivo da soja (Ashraf e Harris, 2004).

A expansão das áreas de cultivo de soja e a adoção de cultivares mais precoces contribuíram para o aumento da área cultivada na safrinha na região Centro-Oeste. Conseqüentemente, o investimento em tecnologias no campo, como a adoção do sistema de plantio direto também contribuíram para a viabilidade da sucessão soja/milho ou sorgo na safrinha (Galvão et al., 2014; Silva et al., 2014). Neste período de safrinha, as culturas do milho e sorgo têm menor potencial produtivo e os riscos de perda aumentam em razão do menor índice pluviométrico existentes nos estágios avançados de desenvolvimento da cultura (Shioga et al., 2011). É oportuno ressaltar que a deficiência hídrica, na região Centro-Oeste, é tida como o componente climático mais limitante ao desenvolvimento e produção das culturas na safrinha, impactando diretamente a produtividade (Von Pinho et al., 2007).

De modo geral, condições de baixa disponibilidade hídrica, podem ter grandes implicações para as culturas de milho e sorgo pois afetam negativamente todos os estágios de desenvolvimento, particularmente o reprodutivo (Wang et al., 2011; Cairns et al., 2012). Nessas condições, a perda de água excede a absorção causando decréscimo no conteúdo de água da planta e redução do turgor resultando em diminuição da expansão celular (Osakabe et al., 2014). Alterações na condutância estomática, desestruturação de membranas, redução da atividade das enzimas antioxidativas, das trocas gasosas e da eficiência do fotossistema II (PSII) são observados em plantas com baixa disponibilidade hídrica (Bhargava e Sawant, 2013; Almeida et al., 2014).

A fim de melhorar a produtividade agrícola em condições de limitação de disponibilidade hídrica, é desejável adotar técnicas que proporcionem melhor tolerância ao estresse hídrico. A tolerância de plantas às condições desfavoráveis, tem sido associada a maior atividade de enzimas como as dismutase do superóxido, catalase, peroxidase do ascorbato e peroxidase de guaiacol, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, minimizando reduções na produtividade (Guerrero et al., 2014; Ribeiro et al., 2014). Várias práticas agronômicas e fisiológicas estão sendo aplicadas para minimizar os efeitos nocivos do estresse hídrico nas culturas. A aplicação de elementos químicos e reguladores de crescimento é uma abordagem pragmática a esse respeito por exercerem influência direta na produtividade de culturas (Farooq et al., 2009; Shi et al., 2014).

Os reguladores de crescimento de plantas são amplamente utilizados em culturas agrícolas para a indução de tolerância à seca (Hai-Hua et al., 2009; Xia et al., 2010). Entre os vários compostos, os brassinosteroides, especialmente o brassinolídeo, é conhecido por regular o crescimento e aumentar a produtividade de plantas, protegendo-as de vários estresses abióticos e bióticos (Jager et al., 2008; Kutschera e Wang, 2012).

O brassinolídeo é um tipo relativamente novo de hormônio vegetal que mostra grande ocorrência no reino vegetal com efeitos biológicos únicos no crescimento e desenvolvimento (Clouse e Sasse 1998). Esta substância tem efeitos biológicos em baixas concentrações, sendo sintetizadas em diferentes órgãos das plantas (Gomes, 2011). São reconhecidos como reguladores da transcrição e tradução, melhorando assim a quantidade de proteínas totais e a atividade de enzimas (Fariduddin et al., 2009; Anjum et al., 2011). Além disso, conferem tolerância às plantas contra o ataque de patógenos, pois estes, limitam as produtividades e também diminuem o valor agregado e qualidade do produto final (Krishna, 2003).

A aplicação exógena do brassinosteróide foi testada em diferentes culturas agrícolas com a finalidade de compreender os mecanismos de ação deste composto (Farooq et al., 2009; Ali et al., 2011; Anjum et al., 2011). Em soja, a aplicação do regulador no início da floração em plantas submetidas ao estresse hídrico aumentou a tolerância à seca e as reduções na produtividade foram minimizadas (Zhang et al., 2008). Em plântulas de tomate, a melhoria das relações hídricas foi obtida pelo aumento do nível endógeno de ácido abscísico e/ou as atividades de enzimas antioxidantes quando tratadas com brassinolídeo (Yuan et al., 2010). Da mesma forma, em arroz notou-se maior tolerância à seca pelo aumento na retenção de água na folha e

assimilação de CO₂ (Farooq et al., 2009). Trabalhos com sementes de sorgo tratadas com brassinosteroides mostrou aumento da emergência e crescimento das plântulas sob estresse osmótico (Vardhini et al., 2011). Na cultura do mamão, o aumento na área foliar e na massa seca da planta foi verificado com a aplicação exógena do regulador (Gomes et al. 2013). No milho, Anjum et al. (2011) concluíram que o brassinolídeo melhora a tolerância à seca, com base nas alterações de antioxidantes enzimáticos e aumento da síntese de proteína.

Efeitos causados nas plantas sob baixa disponibilidade hídrica, também podem ser diminuídos quando se utiliza o silício. A deposição na parede celular das folhas, formando uma dupla camada protetora, evita perdas de água nessas condições, por causa da menor taxa de evapotranspiração da planta (Kaya et al., 2006). Além disso, essa camada protetora funciona como barreira mecânica contra patógenos aumentando, conseqüentemente, a resistência das plantas e reduzindo as infestações e os prejuízos causados pelas pragas (Karmollachaab et al., 2013; Cantuário et al., 2014).

O silício apresenta-se de forma abundante na crosta terrestre e está presente em níveis consideráveis na maioria dos solos, encontrando-se na forma de óxido de silício (Jones e Handreck, 1967). O cultivo intensivo e consecutivo leva a diminuição da concentração do elemento no solo, refletindo de forma significativa na produtividade final de algumas culturas, especialmente em gramíneas acumuladoras, como milho e sorgo (Menegale et al., 2015). A presença do silício pode levar a melhorias nas culturas, principalmente quando são considerados os aspectos morfológicos e/ou fisiológicos por meio do aumento da capacidade fotossintética, redução na evapotranspiração das folhas e na condutância estomática (Pareek et al., 2017).

Alterações fotossintéticas de plantas mediante aplicação de silício em condições de estresse hídrico, pode induzir aumentos na concentração das enzimas antioxidantes proporcionando maior taxa de CO₂ assimilável pelas folhas (Gong et al., 2008). Segundo Shi et al. (2014), o silício pode melhorar a germinação de semente e amenizar o estresse oxidativo em mudas de tomate. Além disso, pode também aumentar a resistência mecânica nas folhas de milho, possibilitando reduzir doses de inseticidas (Neri et al., 2005). Sugere-se com isso que o silício possa induzir a tolerância as plantas quando submetidas a condições de estresse (Menegale et al., 2015).

Apesar dos exemplos mencionados, são escassos os trabalhos relatando os efeitos dos brassinosteroides e do silício na cultura do milho e sorgo em condições de campo. Segundo Taiz et al. (2017), há necessidade de estudos com o uso de

brassinosteróide na agricultura em escala de campo. Os estudos têm sido conduzidos atualmente em países como Japão, China, Coreia e Rússia. Os resultados experimentais têm se apresentado altamente viáveis e parecem refletir as respostas que esse regulador pode inferir nas plantas cultivadas, com efeitos positivos na produtividade quando a cultura está sob condições de estresse (Taiz et al., 2017; Ali et al., 2011; Kutschera e Wang, 2012).

No Brasil, principalmente na região Centro-Oeste, a condução de trabalhos com o propósito de induzir tolerância a deficiência hídrica em condições de sucessão de culturas, é de grande valia. Isto porque neste período, a deficiência hídrica nos estádios mais avançados de desenvolvimento de milho e sorgo, é muito comum e frequente, impactando diretamente na produtividade das culturas.

Desta forma, a aplicação de brassinolídeo e a utilização de silício podem representar uma estratégia para melhorar a tolerância à seca nas culturas de safrinha como o milho e o sorgo, na região do Cerrado, minimizando os efeitos do estresse hídrico. Esta tolerância a seca pode resultar em maiores produtividades e aumento na renda dos agricultores.

1.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIAHA, M. S.; AGBA, O. A.; ATTOE, E. E.; OJIKPONG, T. O.; KEKONG, M. A.; OBIO, A.; UNNIE, U. L. Effect of maize (*Zea mays* L.) on human development and the future of man-maize survival: A review. **World Scientific News**, v. 59, n.1 p. 52-62, 2016.

ALI, Q.; ASHRAF, M. Induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) due to exogenous application of trehalose: growth, photosynthesis, water relations and oxidative defence mechanism. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 258-271, 2011.

ALMEIDA, J. P. N.; PINHEIRO, C. L.; LESSA, B. F. C.; GOMES, F. M.; MEDEIROS FILHO, S. Estresse hídrico e massa de sementes na germinação e crescimento de plântulas de *Amburana cearensis* (Allemão) AC Smith. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 777-787, 2014.

ALVARENGA, R. C.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. Informe Agropecuário, v. 22, n. 208, p. 25-36, 2001.

ANDRADE NETO, R. C.; MIRANDA, N. O.; DUDA, G. P.; GÓES, G. B.; LIMA, A. S. Crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 124-130, 2010.

ANJUM, S. A.; WANG, L. C.; FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; XUE, L. L.; ZOU, C. M. J. Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 197, n. 3, p. 177-185, 2011.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**, v. 166, n. 1, p. 3-16, 2004.

BHARGAVA, S.; SAWANT, K. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression (Review). **Plant Breeding**, v. 132, n. 1, p. 21-32, 2013.

CAIRNS, J. E.; SONDER, K.; ZAIDI, P. H., VERHULST, P. N.; MAHUKU, G.; BABU, R.; NAIR, S. K.; DAS, B.; GOVAERTS, B.; VINAYAN, M. T.; RASHID, Z.; NOOR, J. J.; DEVI, P.; VICENTE, F. S.; PRASANNA, B. M. Maize production in a changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies. **Advances in Agronomy**, v.114, p. 1-58, 2012.

CANTUÁRIO, F. S.; LUZ, J. M. Q.; PEREIRA, A. I. A.; SALOMÃO, L. C.; REBOUÇAS, T. N. H. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 215-219, 2014.

CLOUSE, S. D.; SASSE, J. Brassinosteroids: essential regulators of plant growth and development. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 49, n. 1, p. 427-451, 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 4 Safra 2016/17 - **Décimo segundo levantamento**, Brasília, p. 1-158, 2017.

DUARTE, J. O. Mercado e Comercialização. In: RODRIGUES, J. A. S. **Cultivo do sorgo**. 8. ed. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 26p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAOSTAT), Statistical Database. In: TRIPATHI, A., TRIPATHI, D. K., CHAUHAN, D. K., KUMAR, N., SINGH, G. S. Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: a review on current knowledge and future prospects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 356-373, 2016.

FARIDUDDIN, Q.; KHANAM, S.; HASAN, S. A.; ALI, B.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Effect of 28-homobrassinolide on the drought stress-induced changes in photosynthesis and antioxidant system of *Brassica juncea* L. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, n. 5, p. 889-897, 2009.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; BASRA, S. M. A.; DIN, I. U. Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**. v. 195, n. 4, p. 262-269, 2009.

FORNASIERE FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. São Paulo: FUNEP, 2007. 273p.

GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V.; TROGELLO, E.; FRITSCHÉ-NETO, R. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Ceres**, v. 61, n. 7, p. 819-828, 2014.

GOMES, M. A.; NETTO, A. T.; CAMPOSTRINI, E.; SMITH, R. B.; ZULLO, M. A. T.; FERRAZ, T. M.; SIQUEIRA, L. N.; LEAL, N. R.; VÁZQUEZ, M. N. Brassinosteroid analogue affects the senescence in two papaya genotypes submitted to drought stress. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, n. 3, p. 186-195, 2013.

GOMES, M. M. A. Physiological effects related to brassinosteroid application in plants. In: HAYAT, S.; AHMAD, A. **Brassinosteroids: a Class of Plant Hormone**. 1. ed. New York: Springer, 2011, p. 193-242.

GONG, H. J. CHEN, K. M.; ZHAO, Z. G.; CHEN, G. C.; ZHOU, W. J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 3, p. 592-596, 2008.

GUERRERO, Y. R.; AYAN, L. R.; GONZÁLEZ, L. M.; MORALES, L. M. M.; VÁZQUEZ, M. N. Efecto de los brasinoesteroides y un inhibidor de su biosíntesis en plántulas de variedades de tomate sometidas a estrés salino. **Cultivos Tropicales**, v. 35, n. 1, p. 25-34, 2014.

HAI-HUA, W.; TAO, F.; XI-XU, P.; MING-LI, Y.; PING-LAN, Z.; XIN-KE, T. Ameliorative effects of brassinosteroid on excess manganese-induced oxidative stress in *Zea mays* L. leaves. **Agricultural Sciences in China**, v. 8, n. 9, p. 1063-1074, 2009.

JAGER, C. E.; SYMONS, G. M.; ROSS, J. J.; REID, J. B. Do brassinosteroids mediate the water stress response? **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 2, p. 417-425, 2008.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v.19, p.107-149, 1967.

KARMOLLACHAAB, A.; BAKHSHANDEH, A.; GHARINEH, M. H.; MORADITELAVAT, M. R.; FATHI, G. Effect of silicon application on physiological characteristics and grain yield of wheat under drought stress condition. **International journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 1, p. 30-37, 2013.

KAYA, C.; TUNA, L.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, n. 8, p. 1469-1480, 2006.

KRISHNA P. Brassinosteroid-mediated stress responses. **Journal of Plant Growth and Regulation**, v. 22, n. 4, p. 289-297, 2003.

KUTSCHERA, U.; WANG, Z. Brassinosteroid action in flowering plants: a Darwinian Perspective (Darwin review). **Journal of Experimental Botany**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2012.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n. especial, p. 435-454, 2015.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Brasil projeções do agronegócio 2016/2017 a 2026/2027**, 8ª edição, 2017.

NERI, D. K. P.; MORAES, J. C.; GAVINO, M. A. Interação silício com inseticida regulador de crescimento no manejo da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (JE Smith, 1797) (*Lepidoptera: Noctuidae*) em milho. **Ciência Agrotecnologia**, v. 29, n. 6, p. 1167-1174, 2005.

OSAKABE, Y.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. 86, p. 01-08, 2014.

PAREEK, S.; SAGAR, N. A.; SHARMA, S.; KUMAR, V.; AGARWAL, T.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A.; YAHIA, E. M. Chlorophylls: Chemistry and Biological Functions. **Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health**, v. 1, n. 2, p. 269-284, 2017.

POSSAMAI, J. M.; SOUZA, C. M.; GALVÃO, J. C. C. Sistemas de preparo do solo para o cultivo do milho safrinha. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 79-82, 2001.

RIBEIRO, M. V.; DEUNER, S.; BENITEZ, L.C.; EINHARDT, A. M.; PETERS, J. A.; BRAGA E. J. B. Betacyanin and antioxidant system in tolerance to salt stress in *Alternanthera philoxeroides* betacyaninas y el sistema de antioxidantes en la tolerancia al estrés salino de *Alternanthera philoxeroides*. **Agrociência**, v. 48, n. 2, p. 199-210, 2014.

ROSEGRANT, M.W.; PAISNER, M.S.; MEIJER, S.; WITCOVER, J. 2020 Global food outlook: trends, alternatives, and choices. **International Food Policy Research Institute**, v. 11, 2001, 18p.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H.; JIAWEN, W.; SUN, H.; GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 78, p. 27-36, 2014.

SHIOGA, P. S.; GERAGE, A. C.; SERA, G. H.; ARAÚJO, P. M.; BIANCO, R. **Avaliação Estadual de Cultivares de Milho Safrinha**. 1ª Ed. Londrina: IAPAR, 2011. 78p.

SILVA, A. G.; MORAES, L. E.; HORVATHY NETO, A.; TEIXEIRA, I. R.; SIMON, G. A. Consórcio sorgo e braquiária na entrelinha para produção de grãos, forragem e palhada na entressafra. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 697-705, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TARDIN, F. D.; FILHO, J. E. A.; OLIVEIRA, C. M.; LEITE, C. E. P.; MENEZES, C. B.; MAGALHÃES, P. C.; RODRIGUES, J. A. S.; SCHAFFERT, R. E. Avaliação agrônômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 2, p. 102-117, 2013.

UNITED DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) World agricultural production, Circular series WAP 5-18, may 2018.

VARDHINI, B. V.; SUJATHA, E.; RAO, S. S. R. Brassinosteroids: alleviation of water stress in certain enzymes of sorghum seedlings, **Journal of Phytology**, v. 3, n. 10, p. 38-43, 2011.

VON PINHO, R. G.; VASCONCELOS, R. C.; BORGES, I. D.; RESENDE, A. V. Rendimento e qualidade da silagem de milho e sorgo em função da época de semeadura. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 235-245, 2007.

WANG, M.; LI, Y.; YE, W.; BORNMAN, J.F.; YAN, X. Effects of climate change on maize production and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China. **Climate Research**, v. 46, n. 3, p. 223-242, 2011.

XIA, X-J.; CHEN, Z.; YU, J-Q. ROS mediate brassinosteroids-induced plant stress responses. **Plant Signaling & Behavior**, v. 5, n. 5, p. 532-534, 2010.

YUAN, G-F.; JIA, C-G.; LI, Z.; SUN, B.; ZHANG, L-P.; LIU, N.; WANG, Q-M. Effect of brassinosteroids on drought resistance and abscisic acid concentration in tomato under water stress. **Scientia Horticulturae**, v. 126, n. 2, p. 103-108, 2010.

ZHANG, M.; ZHAI, Z.; TIAN, X.; DUAN, L.; LI, Z. Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). **Plant growth regulation**, v. 56, n. 3, p. 257-264, 2008.

2. OBJETIVO

2.1. Geral

Avaliar os efeitos do brassinolídeo e do silício nas culturas do milho e sorgo cultivados na safrinha.

2.2. Específicos

- Gerar informações sobre o efeito da aplicação do brassinolídeo e silício nas variáveis fisiológicas, bioquímicas e agronômicas em plantas de milho e sorgo em condições de safrinha;
- Identificar as doses do brassinolídeo que proporciona maiores produtividades de milho e de sorgo;
- Avaliar o potencial do brassinolídeo e do silício em modular as plantas de milho e sorgo melhorando a tolerância às condições adversas do meio ambiente.

3. CAPÍTULO I

BRASSINOLÍDEO E SILÍCIO NA CULTURA DO MILHO

(Normas de acordo com a revista *Journal of Plant Growth Regulation*)

RESUMO

Os efeitos do estresse na produção das culturas agrícolas crescem em importância primordial no século XXI. A deficiência hídrica é considerada a maior restrição na produção de culturas de sucessão, como o milho. Diante disto, este estudo teve como objetivo explorar o possível papel do brassinolídeo e do silício na cultura do milho cultivado após a colheita da soja. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 5x2 referentes a cinco doses do brassinolídeo (0,000; 0,050; 0,100; 0,150 e 0,200 mg L⁻¹) e dois tratamentos com silício (sem e com) em quatro repetições. A aplicação de brassinolídeo foi realizada quando a umidade do solo de 0 – 20 cm atingia 16,25%, ou seja, no ponto crítico de umidade para a cultura. Em 2015 a aplicação de BL ocorreu no estágio R2 (grãos com aspecto de uma bolha d'água) e em 2016 em V10 (dez folhas completamente desenvolvidas). As aplicações de Si foram realizadas em V3 (três folhas completamente desenvolvidas) e em V8 (oito folhas completamente desenvolvidas). O regulador induziu o crescimento e as atividades fisiológicas e metabólicas, mediante acréscimo da síntese de proteína e açúcares, permitindo assim, a manutenção do potencial hídrico e a atividade de enzimas antioxidantes, diminuindo a peroxidação lipídica sob condições de déficit hídrico. O efeito foi mais pronunciado sob condições de deficiência hídrica e aplicado no estágio vegetativo, porém, mesmo na ausência de estresse hídrico os resultados sobre a produção foram satisfatórios. As doses que proporcionaram maiores produtividades

foram de 0,149 mg L⁻¹ em 2015 e 0,134 mg L⁻¹ em 2016. O Si proporcionou menores danos de pragas e severidade de doenças, além da maior retenção de água nas plantas diminuindo os danos metabólicos das células. Com isto, BL e Si abrem novas abordagens para a tolerância das plantas as condições adversas do meio ambiente.

Palavras-chave: Estresse hídrico, produtividade, *Zea mays*, brassinosteróide.

ABSTRACT

The stress effects on agricultural crop production are of prime importance in the 21st century. Water deficiency is considered the major constraint in the succession crops, production such as maize. The objective of this study was to explore the possible role of brassinolide (BL) and silicon (Si) in maize cultivation after soybean harvest. The experimental design was a randomized block in a 5x2 factorial scheme for five BL doses (0.000, 0.050, 0.100, 0.150 and 0.200 mg L⁻¹) and two treatments with silicon (without and with) in four replicates. The application of brassinolide was performed when soil moisture of 0 - 20 cm reached 16.25%, that is, in the critical point of humidity for the crop. In 2015 the application of BL occurred in the R2 stage (grains with the appearance of a water bubble) and in 2016 in V10 (ten completely developed leaves). Si applications were performed on V3 (three fully developed leaves) and V8 (eight fully developed leaves). The regulator induced the growth and physiological and metabolic activities, by increasing protein synthesis and sugars, thus allowing the maintenance of water potential and the activity of antioxidant enzymes, reducing lipid peroxidation under water deficit conditions. The effect was more pronounced under conditions of water deficit and applied at the vegetative stage, but even in the absence of water stress the results on the production were satisfactory. The doses that provided the highest yields were 0.149 mg L⁻¹ in the 2015 and 0.134 mg L⁻¹ in 2016. Si provided lower pest damage and disease severity, as well as higher water retention in plants and metabolic damages of the cells. With this, BL and Si open new approaches to plant tolerance to adverse environmental conditions.

Key words: Water stress, Productivity, *Zea mays*, Brassinosteroid.

3.1 Introdução

A variabilidade climática tem sido a principal fonte de flutuações na produção global de alimentos (Tripathi et al., 2016). No Brasil, mesmo com grande variabilidade climática, é possível cultivar duas safras no mesmo ano agrícola. Porém, a segunda safra ou cultivo em sucessão, realizado após a colheita da soja, é normalmente caracterizada pela deficiência hídrica impactando diretamente a produção das culturas (Heinemann et al., 2009).

A produtividade das culturas é o elemento chave para o desenvolvimento rural sustentável sendo indicador da segurança alimentar do País (Palazzo et al., 2017). Dentre os produtos agrícolas mais dinâmicos do agronegócio, o milho se destaca com significativa relevância pela diversidade de alimentos fornecidos a crescente população mundial, com perspectivas de duplicar a demanda até 2050 (Rosegrant et al., 2001). Este cereal tem representando 80% da participação de mercado global sendo produzido em 1184 milhões de hectares, principalmente nos países em desenvolvimento de renda média baixa (USDA, 2018).

No cenário agropecuário nacional, é crescente a importância do cultivo do milho, principalmente na segunda safra. O cereal tem sido cada vez menos cultivado na safra de verão, devido ao cultivo de soja, sendo implantada em sucessão, tornando-se mais uma alternativa econômica para ser utilizada após a colheita da soja precoce (Fornasieri Filho, 2007). Porém, o ambiente na segunda safra é, sabidamente, caracterizado por instabilidades climáticas, em que a deficiência hídrica é o fator de maior risco para as culturas (Possamai et al., 2001; Heinemann et al., 2009).

A deficiência hídrica é uma das principais causas de redução da produtividade em milho, exercendo efeitos variados sobre a planta, em função do estágio de desenvolvimento e intensidade do estresse (Cairns et al., 2012; Tripathi et al., 2016). Se a deficiência hídrica coincidir com o período do florescimento, fase que determina a quantidade de óvulos a serem fecundados, os efeitos sobre a produção de grãos são acentuados (Wang et al., 2011; Cairns et al., 2012). De acordo com Ortolani e Camargo (1987), sem considerar os efeitos extremos, a limitação hídrica neste período é responsável por perdas de até 60 a 70% na produtividade.

Para aumentar a produtividade agrícola em condições de limitação hídrica, é de suma importância induzir tolerância das culturas à seca. Em adição, várias práticas agronômicas e fisiológicas têm sido estudadas e aplicadas. Estudos com elementos químicos e reguladores de crescimento têm demonstrado esse envolvimento na

modulação da resposta das plantas a vários tipos de estresse (Farooq et al., 2009; Ali et al., 2011; Anjum et al., 2011; Shi et al., 2014).

Os reguladores de crescimento de plantas têm sido utilizados em culturas agrícolas para a indução de tolerância à seca (Hai-Hua et al., 2009; Xia et al., 2010). Os brassinosteroides, principalmente o brassinolídeo, está bastante presente no reino vegetal com efeitos biológicos específicos no crescimento e desenvolvimento (Anjum et al., 2011; Vardhini et al., 2011). Sua aplicação estimula processos metabólicos como a fotossíntese, síntese de ácidos nucleicos e proteínas, aumentando a atividade da ATPase, da fosfoenol-piruvato carboxilase (PEPcase) e ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBPcase) proporcionando maiores produtividades (Honnerová et al., 2010; Ali et al., 2011). O brassinolídeo pode exercer efeito anti-*stress* ou (antistresse) nas plantas, ajudando a superar as baixas e altas temperaturas, seca e infecção por patógenos (Krishna 2003). O aumento da tolerância ao estresse aparece devido a maior estabilidade das membranas pela manutenção de atividades de enzimas antioxidantes elevadas (Vardhini, 2012).

Assim como os reguladores vegetais, a presença de silício também pode conferir maior resistência das plantas as condições adversas, garantindo alta produção de grãos (Kaya et al., 2006; Karmollachaab et al., 2013; Amin et al., 2015). Estudos recentes têm mostrado que o silício pode estimular o crescimento e a produção vegetal. Pode também, propiciar proteção contra fatores abióticos, como estresse hídrico, por promover o enrijecimento da parede celular das folhas reduzindo as perdas de água por transpiração (Shi et al., 2014). Além disto, a presença do elemento pode estar relacionada a maior resistência das plantas ao ataque de pragas e doenças por conta de alterações na anatomia da planta, como a formação de células epidérmicas mais grossas e maior grau de lignificação e/ou silicificação (Bakhat et al., 2018).

Assim, a aplicação de brassinolídeo e a utilização de silício pode ser uma estratégia importante para melhorar a tolerância à seca da cultura do milho em condições de sucessão de culturas no cerrado brasileiro, além de proteger as plantas de fatores bióticos. Com isso, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação do brassinolídeo e do silício na cultura do milho cultivado após a colheita da soja.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Informações gerais

O experimento foi conduzido a campo após a colheita da soja precoce (cultivo em sucessão), nos anos de 2015 e 2016, no município de Ipameri-GO (17⁰67'90"S, 48⁰19'59"W e altitude de 805 m), caracterizado por possuir clima Aw, segundo a classificação de Köppen, com duas estações bem definidas: a chuvosa, de outubro a abril, e a seca, compreendida entre os meses de maio a setembro. As variações de temperatura média do ar e precipitação e umidade do solo durante a condução do experimento estão apresentadas nas Figuras 1 e 2.

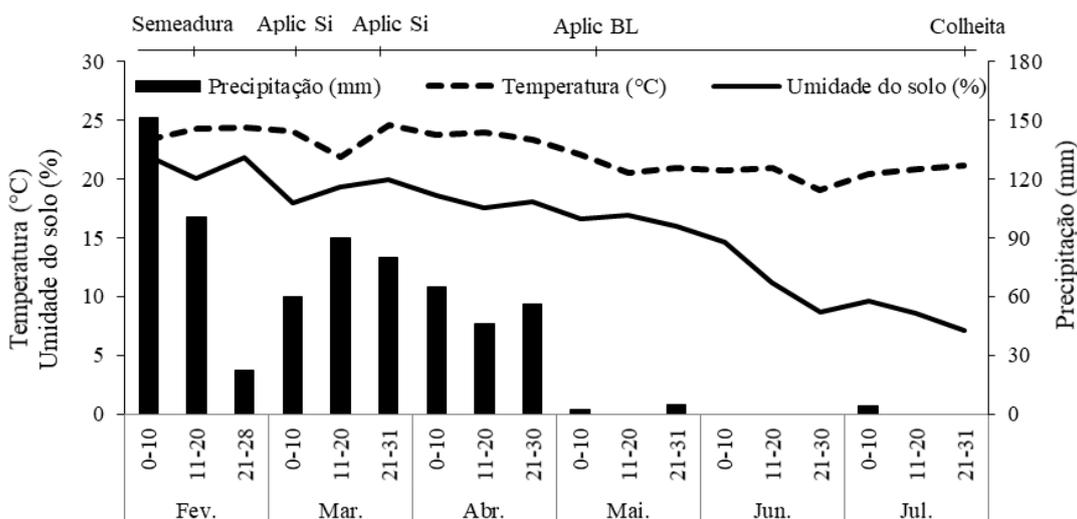


Figura 1. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro a julho de 2015, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).

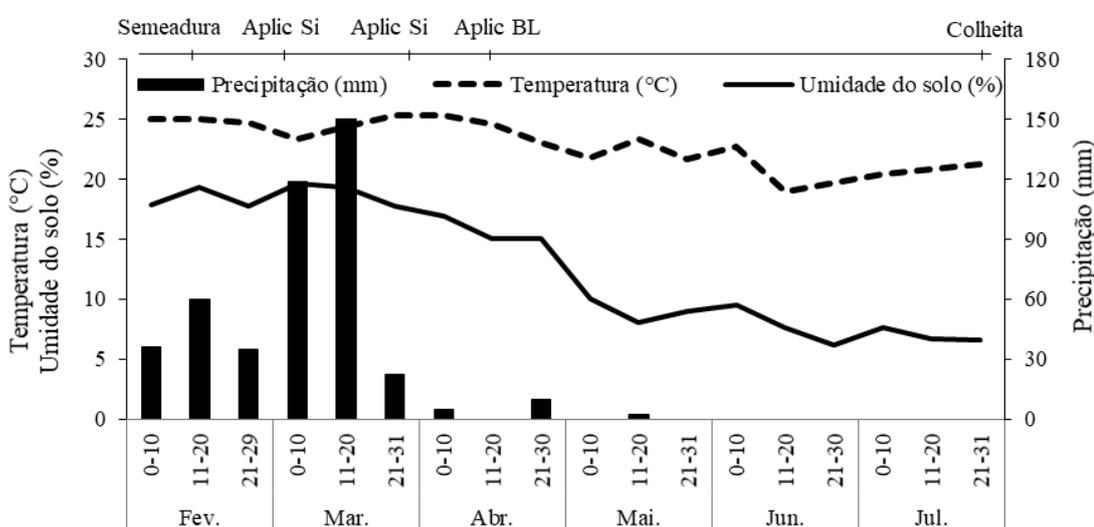


Figura 2. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro a julho de 2016, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-amarelo (Embrapa Solos, 2013). Os resultados da análise química da amostra de solo da área experimental em 2015 foram caracterizados por pH em CaCl₂: 5,9; Ca, Mg, K, Al, H+Al e CTC: 2,3; 0,8; 0,18; 0,0; 2,1 e 5,4 em cmol_c dm⁻³, respectivamente; P: 10,0 mg dm⁻³; saturação de bases: 61%, matéria orgânica: 26,00 g dm⁻³. Em 2016, foram caracterizados por pH em CaCl₂: 5,5; Ca, Mg, K, Al, H+Al e CTC: 2,3; 1,5; 0,13; 0,0; 2,2 e 6,3 em cmol_c dm⁻³, respectivamente; P: 4,8 mg dm⁻³; saturação de bases: 62%, matéria orgânica: 33,00 g dm⁻³; argila, silte e areia: 620; 120 e 260 g kg⁻¹, respectivamente em ambos os anos.

Foi realizada a análise físico-hídrica do solo de 0,0 – 0,2 m de profundidade para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRA). O resultado da análise na área experimental foi caracterizado por apresentar a θ_{CC} (capacidade de campo em 10KPa): 0,205 kg/kg e θ_{PMP} (ponto de murcha permanente em 1.500 KPa): 0,118 kg/kg. Com os resultados da curva de retenção de água no solo, foi então determinado o ponto de umidade crítica do solo para a cultura do milho. A umidade crítica calculada foi de 0,1625 kg/kg, equivalente a 16,25% de umidade na camada de 0,0 - 0,2 m de profundidade.

Em ambos os anos foi utilizado o cultivar P30S31, após a colheita da soja precoce. Este cultivar é indicado especialmente para o mercado de segunda safra por apresentar alta estabilidade produtiva na região de execução do experimento. A semeadura foi realizada nos dias 19 e 16 de fevereiro, após a colheita da soja precoce, nos anos de 2015 e 2016, respectivamente.

3.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 5x2 referentes a cinco doses do regulador brassinolídeo (BL) (0,000; 0,050; 0,100; 0,150 e 0,200 mg L⁻¹) e dois tratamentos com silício (Si) (sem e com, em aplicação foliar). As parcelas experimentais foram compostas de seis linhas de 6,0 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m. A área útil foi obtida considerando as quatro linhas centrais desconsiderando 0,5 m de cada extremidade (10 m²). Em todas as aplicações foi utilizado pulverizador costal pressurizado por CO₂, munido de barra com duas pontas de pulverização do tipo cônico vazio (Jacto JA) com psi de aproximadamente 100 libras e volume de calda de 200 L ha⁻¹.

O regulador utilizado foi um análogo do brassinosteróide ($C_{28}H_{48}O_6$) (brassinolídeo) da marca comercial SIGMA[®], dissolvido em etanol para obter a solução estoque. Posteriormente foi feita a diluição em água destilada para as doses de acordo com os tratamentos adotados. As plantas que não receberam o regulador foram pulverizadas apenas com água destilada. O silício utilizado foi o Protect Bugram, proveniente de rochas fossilizadas de algas marinhas, constituído principalmente de óxido de silício (SiO_2) com 94,6% de Si. Foi utilizado $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$, seguindo recomendações do produto.

A aplicação de BL foi feita quando a umidade do solo de 0 – 20 cm atingia 16,25%, ou seja, no ponto crítico de umidade para a cultura do milho, calculado a partir do resultado da análise de CRA. Sendo assim, em 2015 a aplicação de BL ocorreu no dia 10 de maio, no estádio R2 (grãos com aspecto de uma bolha d'água) e em 2016 no dia 11 de abril no estádio V10 (dez folhas completamente desenvolvidas). As aplicações de Si, em 2015, foram realizadas no dia 09 de março no estádio V3 (três folhas completamente desenvolvidas) e no dia 31 de março no estádio V8 (oito folhas completamente desenvolvidas). Em 2016 as aplicações de silício foram em 03 de março no estádio V3 e 24 de março no estádio V8.

Uma semana antes da implantação do experimento, em ambos os anos, foi realizada a dessecação das plantas daninhas aplicando-se, mecanicamente, o equivalente a $1.240 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ de glyphosate e $335 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ de 2,4-D em um volume de calda de 100 L ha^{-1} . A adubação e a semeadura foram realizadas com semeadora de dezesseis linhas sendo empregadas populações de 60.000 sementes ha^{-1} e adubação equivalente a 200 Kg do 10-20-15, conforme análise de solo e exigências da cultura. Aos 15 dias após a emergência (DAE), foi aplicado $850 \text{ g i.a ha}^{-1}$ do herbicida atrazina (volume de calda de 100 L ha^{-1}) para o controle de plantas voluntárias de soja e plantas daninhas dicotiledôneas. Para controle de lagartas (*Spodoptera frugiperda*) foi feita somente uma aplicação do inseticida metomil ($0,8 \text{ L ha}^{-1}$) juntamente com o herbicida atrazina. Decorridos 30 DAE, foram aplicados, manualmente, ao lado da linha de semeadura do milho, 150 kg ha^{-1} de nitrogênio na forma de ureia. Não houve aplicação de fungicida justamente para verificar os efeitos que o BL e o Si poderiam exercer sobre a incidência de patógenos.

Para avaliar o efeito da aplicação de BL e do Si na cultura do milho, foram analisadas as variáveis morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, agrônômicas e econômicas de todos os tratamentos.

3.2.3 Monitoramento da umidade do solo

Duas amostras de solo da área experimental foram coletadas de três em três dias, desde a implantação do experimento, nas profundidades de 0,0 a 0,2 m, utilizando trado holandês. Após as coletas, as amostras foram pesadas para obtenção da massa de solo úmido e, em seguida, levadas para estufa a 105°C por 48 horas para a determinação da massa seca. Quando a determinação hídrica no solo atingiu o ponto crítico, foi então, realizada a aplicação de brassinolídeo na cultura do milho, em ambos os experimentos.

3.2.4 Variáveis fisiológicas

Foram utilizadas amostras da terceira folha completamente expandida a partir do ápice, avaliando dez plantas por parcela. As avaliações de pigmentos cloroplastídicos foram feitas aos 15 dias após a aplicação foliar de brassinolídeo.

O conteúdo de pigmentos cloroplastídicos foi determinado por meio da extração com dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com CaCO₃. Três discos foliares de massa fresca, com 5 mm de diâmetro, foram incubados em DMSO em tubos vedados e envolvidos com papel alumínio por um período de 24 horas a 65°C. Posteriormente a absorbância do extrato foi determinada por meio de espectrofotômetro. Alíquotas foram retiradas para leitura espectrofotométrica a 480, 649 e 665 nm. O conteúdo de clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*) e carotenoides (Car) foram determinados seguindo a equação proposta por Wellburn (1994) e a degradação da clorofila avaliada pelo índice de feofitinação (IF= A₄₃₅/A₄₁₅).

3.2.5 Variáveis bioquímicas

Amostras da terceira folha completamente expandida, a partir do ápice, foram coletadas às 12 horas, embrulhadas em papel alumínio e imersas em nitrogênio líquido. Essas variáveis foram realizadas aos 15 dias após a aplicação foliar de BL, sendo avaliadas 10 plantas por parcela. Para as variáveis bioquímicas, foram determinadas:

a) Enzimas envolvidas no metabolismo antioxidativo e proteínas: um grama desse material foi homogeneizado em 3 mL de solução tampão de fosfato de sódio (0,05 M, pH 7,8, EDTA 1 mM e PVP 2% p/v). O homogeneizado foi centrifugado e o sobrenadante (extrato bruto) foi utilizado para determinar as atividades da dismutase do superóxido (SOD), da catalase (CAT), peroxidase do ascorbato (APX) e peroxidase de

guaiacol (POD), segundo Azevedo et al. (1998) além da determinação do teor de proteína.

b) Determinação do conteúdo de proteínas solúveis totais: determinação a partir de 25 μ L de extrato obtido pela trituração de material vegetal fresco (folhas), que foi misturado ao reativo (Coomassie Blue G 250 preparado com ácido fosfórico e etanol) para realização de leitura da absorvância no espectrofotômetro a 595 nm (Bradford, 1976).

c) Peroxidação de lipídios: a determinação de malondialdeído (MDA) foi realizada segundo metodologia proposta por Cakmak e Horst (1991), obtido por homogeneização de 0,3 g de folhas em 2 mL de TCA, centrifugada e adicionada 1,5 mL de TBA. Em seguida as amostras foram lidas em espectrofotômetro em absorvância de 532 nm, sendo os resultados expressos em nmol MDA g^{-1} de massa fresca.

d) Permeabilidade de membranas: avaliada pela liberação de eletrólitos (TLE) de discos de folhas imersos em 30 mL de água destilada em tubos de ensaio, segundo metodologia descrita por Vasquez-Tello et al. (1990) e Pimentel et al. (2002).

e) Amido e açúcares solúveis totais e redutor: aproximadamente 200 mg de tecido foliar foi imerso em etanol 80% e aquecido a 65°C por 30 minutos. O extrato foi centrifugado e o sobrenadante coletado em novo tubo. Realizou-se três lavagens do material vegetal para obtenção do extrato final. O extrato etanólico foi utilizado para determinação dos açúcares solúveis totais, redutores. O resíduo sólido da extração foi seco em estufa a 65°C durante 72 horas. Posteriormente foi utilizado para a determinação do teor de amido. As determinações dos teores de açúcares e amido foram realizadas utilizando espectrofotômetro. Para a quantificação de açúcares solúveis totais foi empregado o método fenol-sulfúrico com leitura realizada em comprimento de onda de 490 nm (Dubois et al., 1956) utilizando curva padrão de sacarose. Os açúcares redutores foram determinados conforme método do ácido dinitrosalicílico segundo recomendações de Miller (1959), com leitura em comprimento de onda de 540 nm e utilizando curva padrão de glicose. O amido foi determinado segundo McCready et al. (1950) em comprimento de onda de 490 nm e curva padrão de sacarose em intervalo de 0 a 50 μ g.

3.2.6 Variáveis morfológicas

As análises agronômicas foram realizadas ao final do ciclo da cultura. As avaliações do teor relativo de água foram feitas aos 15 dias após a aplicação do brassinolídeo.

a) Análises agronômicas: foram mensuradas a altura da planta, diâmetro do colmo, área foliar, massa fresca e seca da parte aérea e número de folhas por planta. A altura de planta (medição do nível do solo até a inserção da última folha) e diâmetro de colmo (medição do nível do solo no segundo nó). A área foliar foi obtida através das medidas de comprimento e largura de folhas. Foram avaliadas dez plantas por parcela para cada característica agronômica.

b) Teor relativo de água na folha: para obtenção do teor relativo de água foram retirados cinco discos foliares de 12 mm de diâmetro cada, pesados e colocados por 4 horas para saturar em placas de petri com água destilada. Em seguida, os discos foram novamente pesados e colocados para secar à temperatura de 70°C por 72 horas, sendo posteriormente obtido a massa seca em gramas.

c) Área foliar específica: foram retirados seis discos foliares de 12 mm de diâmetro de folhas totalmente expandidas que posteriormente foram secos em estufa a 70°C por 72 horas, para determinação da massa seca. A área foliar específica foi obtida através da equação proposta por Radford (2013).

3.2.7 Severidade de doenças e danos de pragas

A severidade de doenças e danos de pragas foram avaliados no estágio R3 (grão leitoso, com umidade em torno de 80%), pela análise de dez plantas escolhidas ao acaso, em cada parcela. Para a severidade de doenças, a avaliação foi obtida pela quantificação do percentual de área foliar lesionada na folha da espiga, atribuindo valores de 0 a 100%. Para os danos de pragas foi atribuída nota ao dano provocado por lagartas *Spodoptera frugiperda* de acordo com a escala de nota estabelecida por Davis e Williams (1992).

3.2.8 Teor de silício e nitrogênio na planta

A determinação do Si na planta foi feita aos 20 dias, após a aplicação do brassinolídeo em dez folhas por parcela, segundo metodologia proposta por Korndorfer et al. (2004). O teor de nitrogênio foi determinado conforme Bezerra Neto e Barreto (2011).

3.2.9 Componentes de produtividade

A colheita foi realizada manualmente, na área útil de cada parcela. Posteriormente, foram avaliadas as demais variáveis: número de grãos por espiga, peso de mil grãos, percentual de grãos ardidos, peso de grãos por espiga (pesagem média dos grãos debulhados de dez espigas por parcela), comprimento da espiga (medição do comprimento de dez espigas), produtividade de grãos (pela pesagem dos grãos de todas plantas da área útil da parcela) e índice de colheita (relação da biomassa do órgão de interesse pela biomassa total em dez plantas por parcela). Para determinação da produtividade e do peso de mil grãos foi feita correção da umidade de grãos para 13%.

3.2.10 Análise econômica

A análise econômica foi realizada para todos os tratamentos com estimativa da renda bruta total, renda líquida operacional, margem bruta, índice de lucratividade, preço e produtividade de equilíbrio, segundo metodologia proposta por Martin et al. (1998).

3.2.11 Análises estatísticas

A análise estatística foi efetuada para todas variáveis citadas anteriormente. Para as fontes de variação testadas, foi empregado o teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação das médias da aplicação de silício e análise de regressão para comparação das médias das doses de brassinolídeo.

3.3 Resultados

3.3.1 Experimento milho em 2015

3.3.1.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e doenças

Com a aplicação de BL no milho cultivado após a colheita da soja em 2015, pode-se constatar que nenhuma variável morfológica avaliada foi influenciada pelas doses de BL utilizadas quando a aplicação ocorreu no estágio R2 (Tabela 1). Os resultados permitiram comprovar aumento linear da massa fresca da planta em função

do aumento das doses utilizadas (Figura 3A). Para o teor de nitrogênio nas folhas, o ponto máximo encontrado foi na dose 0,141 mg L⁻¹ com aumento de 15% em relação à testemunha (Figura 3B). A severidade de doenças nas plantas de milho, decresceu linearmente em função das doses de BL (Figura 3C).

A presença de silício alterou somente a área foliar específica das plantas de milho, não afetando as demais variáveis morfológicas (Tabela 1). A aplicação de Si também contribuiu para a redução dos danos causados pelas pragas e severidade de doenças, e colaborou para o aumento da massa fresca das plantas (Tabela 2).

Tabela 1. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP) e de inserção da espiga (AIE), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF) e área foliar específica (AFE) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	AP	AIE	DC	NF	AF	AFE
Brassinolídeo (BL)	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	*
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		1,40	7,13	3,42	3,60	17,70	6,20
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AP (m)	AIE (m)	DC (mm)	NF (-)	AF (cm ²)	AFE (cm ² g ⁻¹)
0,000		2,54	1,35	23,6	12,39	849,29	211,53
0,050		2,55	1,38	25,0	12,34	834,07	215,85
0,100		2,56	1,37	24,7	12,29	884,16	219,55
0,150		2,59	1,37	26,6	12,43	871,99	216,33
0,200		2,56	1,39	25,0	12,48	839,09	216,11
Sem Si		2,56a	1,36a	24,6a	12,33a	849,93a	221,44a
Com Si		2,55a	1,38a	24,7a	12,45a	847,52a	210,31b
Média		2,55	1,37	24,65	12,39	848,72	215,87

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 2. Significâncias e valores médios das variáveis de teor relativo de água (TRA), massa fresca (PF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	TRA	PF	PS	Si	N	DP	SD
Brassinólídeo (BL)	4	ns	*	ns	Ns	**	ns	**
Silício (Si)	1	ns	**	ns	**	ns	**	**
BL x Si	4	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		4,00	11,36	10,62	13,16	7,44	28,24	8,88
Doses de BL (mg L ⁻¹)		TRA (%)	PF (kg)	PS (kg)	Si (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	DP (--)	SD (%)
0,000		66,97	2,01	0,79	5,00	23,57	0,58	36,87
0,050		70,53	2,06	0,79	4,31	26,73	0,40	34,00
0,100		68,56	2,22	0,85	5,10	26,06	0,50	33,00
0,150		68,43	2,38	0,84	6,23	27,08	0,50	33,55
0,200		69,16	2,31	0,86	6,97	26,65	0,52	31,63
Sem Si		69,04a	2,06b	0,82a	3,95b	26,01a	0,70a	36,00a
Com Si		68,42a	2,34a	0,86a	6,99a	26,03a	0,30b	31,60b
Média		68,73	2,20	0,82	5,47	26,02	0,50	33,80

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

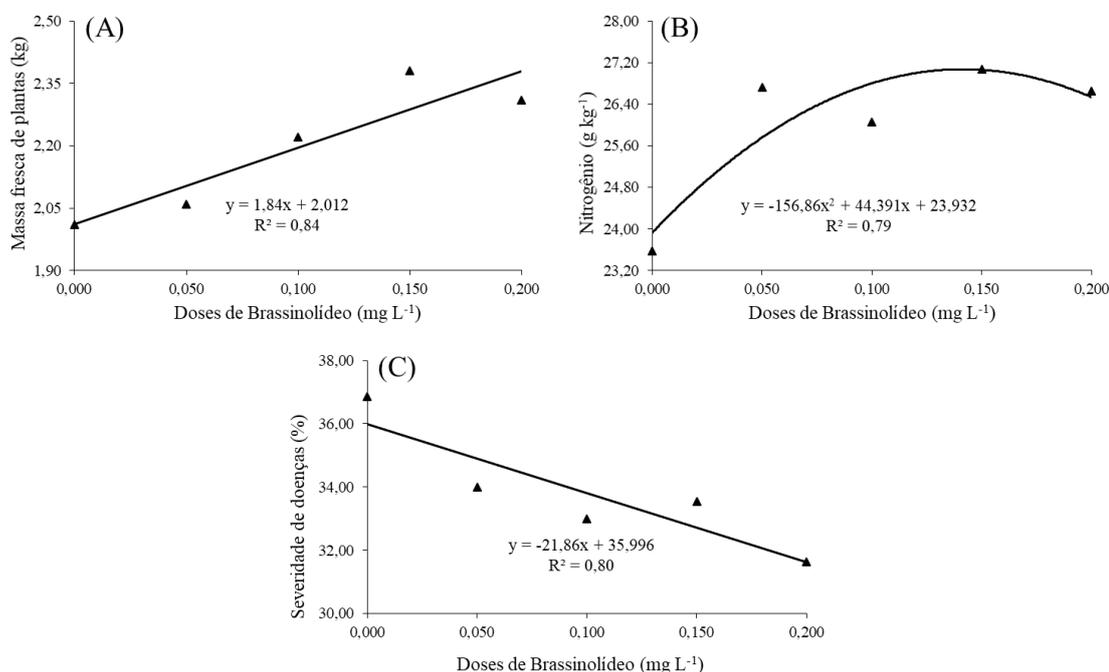


Figura 3. Regressões ajustadas para as variáveis massa fresca de plantas, nitrogênio e severidade de doenças (Figuras 3A, 3B e 3C, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

3.3.1.2 Componentes de rendimento

A aplicação de BL proporcionou aumento significativo na produtividade do milho em todas as doses utilizadas, com maior valor em torno de 16% correspondente a dose de 0,149 mg L⁻¹ (Figura 4C). O aumento da produtividade foi determinado mais

decisivamente pelo peso dos grãos. Neste aspecto, o peso de grãos por espiga e peso de mil grãos aumentou cerca de 23% na dose de 0,199 mg L⁻¹ e 20% na dose de 0,154 mg L⁻¹, respectivamente, em relação à testemunha (Figura 4A e 4B). As demais variáveis dos componentes de rendimento não diferiram significativamente com a aplicação de BL (Tabelas 3 e 4). A maior rentabilidade foi obtida na dose do BL que proporcionou maior produtividade. Em relação a presença do Si, foi notório a redução do percentual de grãos ardidos apesar de não ter contribuído significativamente para o aumento da produtividade (Tabela 4).

Tabela 3. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/espiga (NGE), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), peso de grãos por espiga (PGE), comprimento da espiga (CE), peso de mil grãos (PMG), da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	NGE	NFE	NGF	PGE	CE	PMG
Brassinolídeo (BL)	4	ns	ns	ns	**	ns	*
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		17,80	10,10	10,32	8,74	11,12	10,46
Doses de BL (mg L ⁻¹)		NGE (-)	NFE (-)	NGF (-)	PGE (g)	CE (cm)	PMG (g)
0,000		467,71	15,35	28,43	142,58	17,17	299,11
0,050		469,63	15,20	31,50	156,27	17,08	343,97
0,100		469,00	15,12	31,75	164,72	17,46	345,79
0,150		488,70	15,27	32,12	177,88	17,11	358,87
0,200		470,67	15,57	30,37	174,27	17,40	356,25
Sem Si		469,82a	15,24a	30,48a	156,64a	17,15a	330,65a
Com Si		471,27a	15,37a	31,19a	165,65a	17,28a	346,14a
Média		470,55	15,31	30,84	161,15	17,22	338,40

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de espigas (NE), percentual de grãos ardidos (GA), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de GL	EF	NE	GA	IC	PROD	RENT
Brassinólídeo	4	ns	ns	ns	**	--
Silício (Si)	1	ns	ns	**	ns	--
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	--
C.V. (%)	3,79	3,93	36,52	12,31	7,48	--
Doses de BL (mg L ⁻¹)	EF (pls ha ⁻¹)	NE (-)	GA (%)	IC (kg pl. ⁻¹)	PROD (kg ha ⁻¹)	RENT (R\$ ha ⁻¹)
0,000	59.375	59.583	1,81	55,16	5.790	000,00
0,050	60.208	60.208	1,17	60,01	6.383	183,73
0,100	58.541	58.958	1,47	58,21	6.548	230,47
0,150	58.958	58.750	1,39	63,93	6.672	264,29
0,200	59.999	58.958	1,41	58,36	6.605	237,50
Sem Si	59.083a	59.333a	1,79a	59,10a	6.335a	0,00
Com Si	59.750a	59.249a	1,11b	59,16a	6.463a	4,56
Média	59.416	59.291	1,45	59,13	6.399	4,56

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

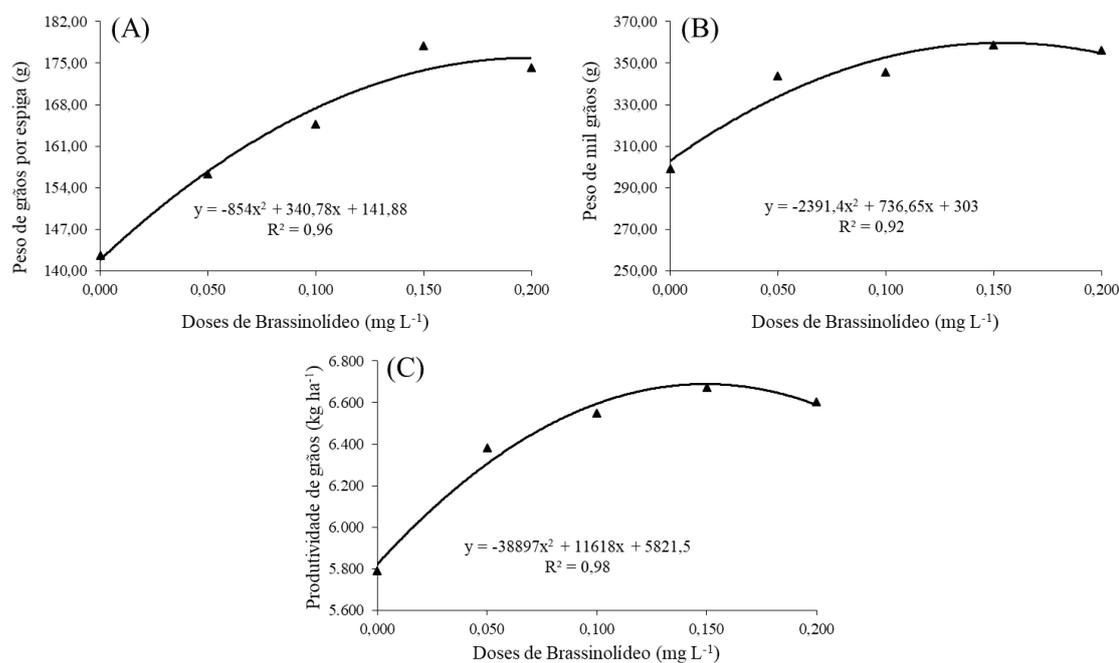


Figura 4. Regressões ajustadas para as variáveis peso de grãos por espiga, peso de mil grãos e produtividade (Figuras 4A, 4B e 4C, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

3.3.1.3 Variáveis fisiológicas

O conteúdo de pigmentos fotossintéticos variou visivelmente nas diferentes doses em plantas tratadas com BL (Tabela 5). O regulador aumentou o conteúdo de

pigmentos fotossintético nas plantas de milho com ajuste linear para clorofila *a*, *b* e total e quadrático para o conteúdo de carotenoide (Figura 5A, 5B, 5C e 5D). Houve aumento de 15% no conteúdo de carotenoides na dose de 0,191 mg L⁻¹. Já a presença de Si não influenciou significativamente em nenhuma característica fisiológica (Tabela 5).

Tabela 5. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	Cl <i>a</i>	Cl <i>b</i>	Car	Clt	IF
Brassinólídeo (BL)	4	**	**	**	**	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		7,14	13,81	4,52	7,41	3,16
Doses de BL (mg L ⁻¹)		Cl <i>a</i> (µg mL ⁻¹)	Cl <i>b</i> (µg mL ⁻¹)	Car (µg mL ⁻¹)	Clt (µg mL ⁻¹)	IF (µg mL ⁻¹)
0,000		5,06	1,25	1,39	6,32	1,20
0,050		5,29	1,34	1,46	6,63	1,19
0,100		5,82	1,54	1,55	7,37	1,21
0,150		6,42	1,78	1,61	8,20	1,22
0,200		6,24	1,80	1,59	8,04	1,19
Sem Si		4,86a	1,54a	1,49a	6,16a	1,20a
Com Si		5,27a	1,58a	1,52a	6,57a	1,19a
Média		5,06	1,57	1,50	6,36	1,19

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

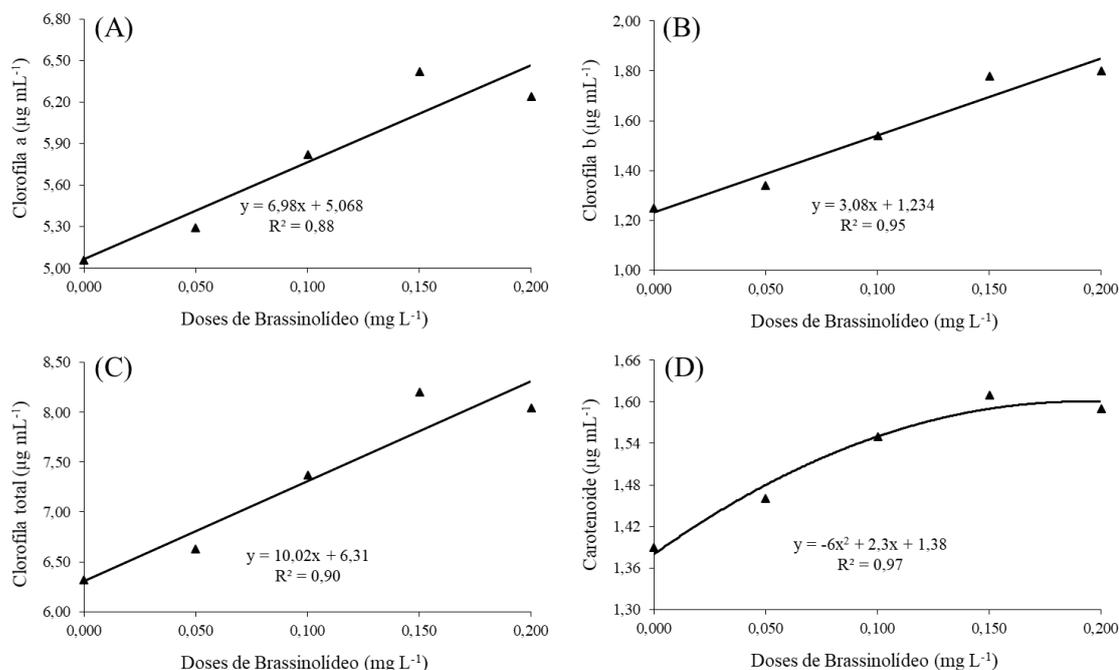


Figura 5. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoide (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO.

3.3.1.4 Variáveis bioquímicas

A integridade de membranas não foi afetada pela ausência de deficiência hídrica severa. Portanto, o BL não proporcionou nenhum efeito significativo sobre o malondialdeído e a taxa de liberação de eletrólitos (Tabela 6). Contudo, a aplicação de BL proporcionou aumento de 23% no teor de proteína solúvel nas folhas na dose de 0,125 mg L⁻¹ (Figura 6A). O BL promoveu também aumento nas atividades de enzimas antioxidantes de plantas de milho (Tabela 7). Os padrões de atividades de SOD e CAT responderam de forma semelhante, constatando aumento linear na atividade com aumento das doses (Figura 6B e 6D). Já a atividade da APX apresentou maior valor na dose de 0,173 mg L⁻¹ com aumento de 54% em relação à testemunha (Figura 6C). No entanto, o Si não interferiu significativamente em nenhuma atividade bioquímica das células de milho (Tabelas 6 e 7).

Tabela 6. Significâncias e valores médios das variáveis açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT), taxa de liberação de eletrólitos (TLE) e malondialdeído (MDA) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	AR	AST	AM	PROT	TLE	MDA
Brassinolídeo (BL)	4	ns	ns	ns	*	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		31,09	17,80	25,18	14,92	4,02	11,67
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AR (%)	AST (%)	AM (%)	PROT (mg mL ⁻¹)	TLE (%)	MDA (nmol g ⁻¹ mf)
0,000		0,55	3,17	1,50	2,82	77,60	6,59
0,050		0,58	3,69	1,68	3,71	78,63	5,90
0,100		0,72	3,89	1,96	3,47	77,21	5,64
0,150		0,77	3,87	1,57	3,48	75,61	6,03
0,200		0,76	3,92	1,64	3,48	76,65	6,12
Sem Si		0,70a	3,67a	1,66a	3,35a	76,40a	5,99a
Com Si		0,66a	3,75a	1,68a	3,45a	77,89a	6,13a
Média		0,68	3,71	1,67	3,40	77,14	6,06

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Significâncias e valores médios das variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	CAT	POD	APX	SOD
Brassinólídeo (BL)	4	*	ns	**	**
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		14,00	13,25	10,55	11,79
Doses de BL (mg L ⁻¹)		CAT (nmol mg ⁻¹ prot)	POD (μmol tetraguaicol min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	APX (umol ascorbato min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	SOD (U mg ⁻¹ prot)
0,000		1,49	148,69	0,18	87,35
0,050		1,70	165,70	0,19	94,84
0,100		1,79	164,30	0,25	103,57
0,150		1,86	175,45	0,28	125,04
0,200		1,94	177,76	0,25	120,67
Sem Si		1,75a	162,13a	0,24a	105,36a
Com Si		1,76a	170,67a	0,23a	107,00a
Média		1,76	166,40	0,24	106,18

**;, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

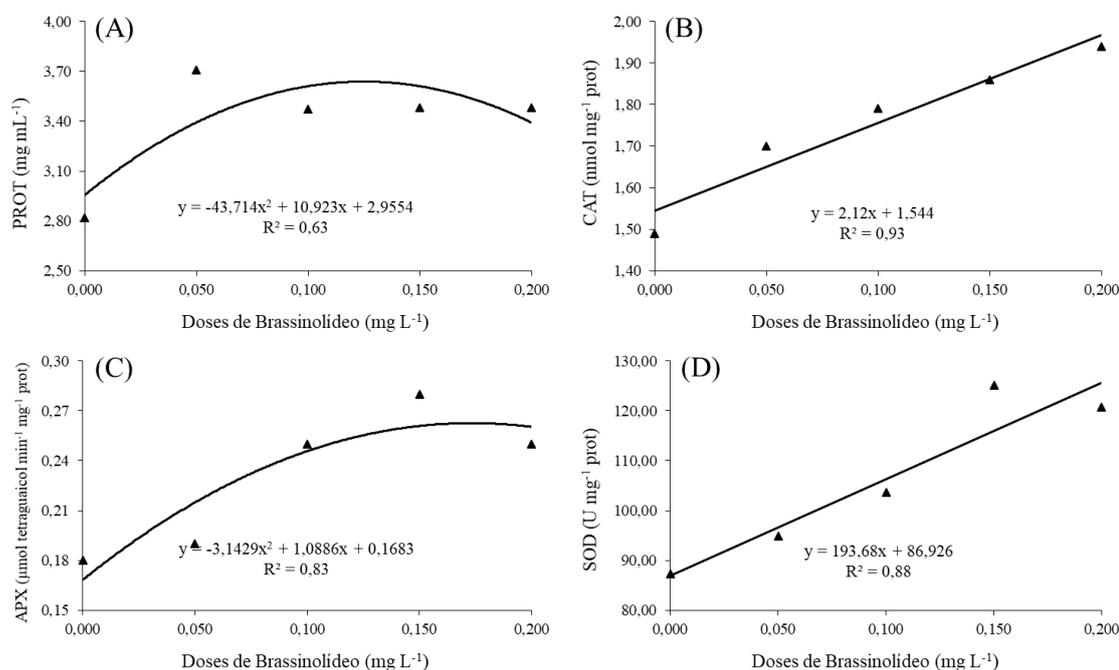


Figura 6. Regressões ajustadas para as variáveis proteína, catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

3.3.2 Experimento milho em 2016

3.3.2.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e doenças

As avaliações feitas em relação aos parâmetros morfológicos permitiram constatar que os tratamentos com BL no estágio V10 promoveram maior crescimento e desenvolvimento das plantas de milho. O BL para as variáveis altura de planta, altura de inserção da espiga e diâmetro do colmo, induziu um aumento mais pronunciado nas doses de 0,129, 0,193 e 0,134 mg L⁻¹, respectivamente (Figuras 7A, 7B e 7C). Já o número de folhas aumentou linearmente com as doses crescentes do regulador (Figura 7D).

Em relação aos danos por pragas e doenças, os resultados permitiram constatar que o BL e Si proporcionaram menores danos de ambas principalmente quando se aumentou as doses do regulador (Figuras 8E e 8F). A interação do BL x Si diminuiu a severidade de doenças nas plantas em até 31% na dose de 0,116 mg L⁻¹ com aplicação de Si (Figura 8F). Os fatores isolados BL e Si, foram significativos para as doenças, pragas e o teor relativo de água na folha, que mostraram um efeito aumentado em função das doses (Tabela 9). Tanto a massa fresca quanto a massa seca de plantas e a maior concentração de nitrogênio nas folhas aumentaram em função do acréscimo das doses de BL (Figuras 8B, 8C e 8D). A presença de Si promoveu menor área foliar específica, ou seja, as espessuras das folhas aumentaram nas plantas que receberam o nutriente, sem influenciar nas demais variáveis morfológicas (Tabela 8).

Tabela 8. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP) e de inserção da espiga (AIE), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF) e área foliar específica (AFE) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	AP	AIE	DC	NF	AF	AFE
Brassinolídeo (BL)	4	**	*	**	**	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	*
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		3,95	3,83	2,29	2,21	3,53	4,63
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AP (m)	AIE (m)	DC (mm)	NF (-)	AF (cm ²)	AFE (cm ² g ⁻¹)
0,000		2,30	1,27	23,76	11,85	816,13	215,95
0,050		2,38	1,28	25,07	12,35	824,35	221,22
0,100		2,42	1,31	24,82	12,27	830,24	221,92
0,150		2,40	1,34	24,81	12,42	835,40	218,45
0,200		2,39	1,33	24,93	12,60	846,10	217,74
Sem Si		2,37a	1,28a	24,69a	12,21a	823,22a	222,14a
Com Si		2,38a	1,31a	24,66a	12,38a	837,66a	215,97b
Média		2,38	1,30	24,68	12,30	830,44	219,06

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

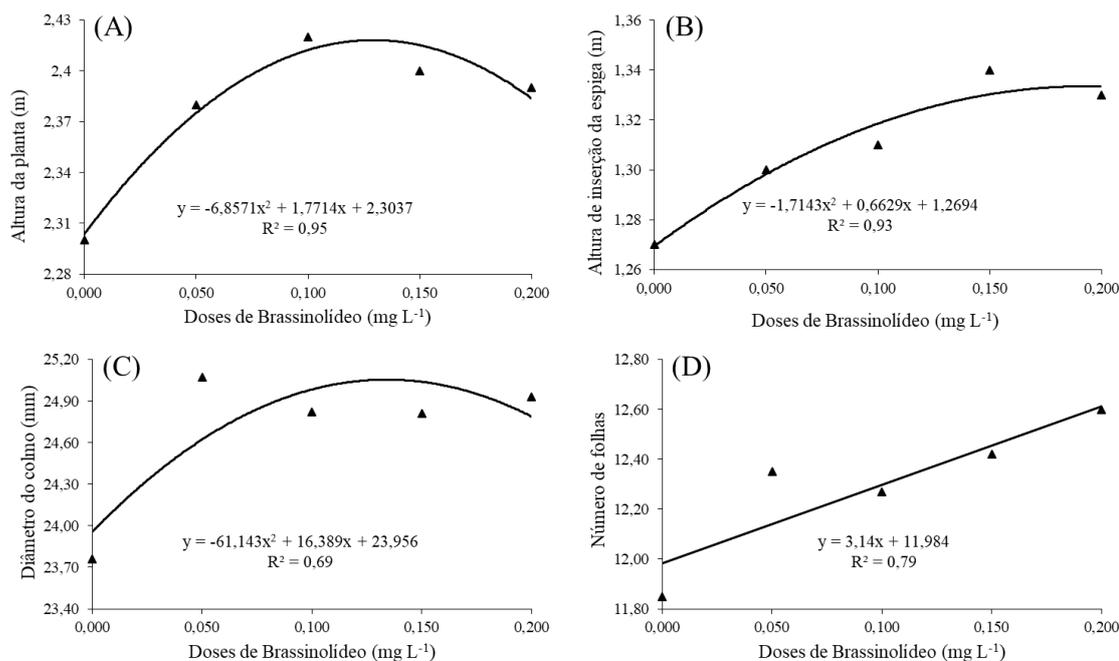


Figura 7. Regressões ajustadas para as variáveis altura de plantas, altura de inserção da espiga, diâmetro do colmo e número de folhas (Figuras 7A, 7B, 7C e 7D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Tabela 9. Significâncias e valores médios das variáveis de teor relativo de água (TRA), massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	TRA	PF	PS	Si	N	DP	SD
Brassinolídeo (BL)	4	**	**	*	ns	**	**	**
Silício (Si)	1	*	ns	ns	**	ns	**	**
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
C.V. (%)		3,03	5,10	8,82	19,21	3,62	19,14	13,78
Doses de BL (mg L ⁻¹)		TRA (%)	PF (kg)	PS (kg)	Si (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	DP (--)	SD (%)
0,000		65,72	1,55	0,74	5,53	22,70	3,10	11,25
0,050		68,40	1,53	0,76	5,48	23,42	2,25	10,18
0,100		69,81	1,61	0,77	4,96	23,68	2,62	9,62
0,150		69,88	1,68	0,80	5,80	24,55	2,37	8,75
0,200		69,96	1,70	0,80	5,20	24,69	1,82	8,87
Sem Si		68,25b	1,61a	0,76a	4,40b	23,84a	2,89a	11,48a
Com Si		68,94a	1,62a	0,78a	6,67a	23,78a	1,98b	8,00b
Média		68,60	1,62	0,77	5,54	23,81	2,44	10,11
	Doses de BL (mg L ⁻¹)							
SD (%)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média		
S/ Si	13,00a	12,25a	12,25a	10,75a	9,13a	11,48		
C/ Si	9,50b	8,13b	7,00b	6,25b	8,63a	7,90		
Média	11,25	10,19	9,63	8,50	8,88	9,69		

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

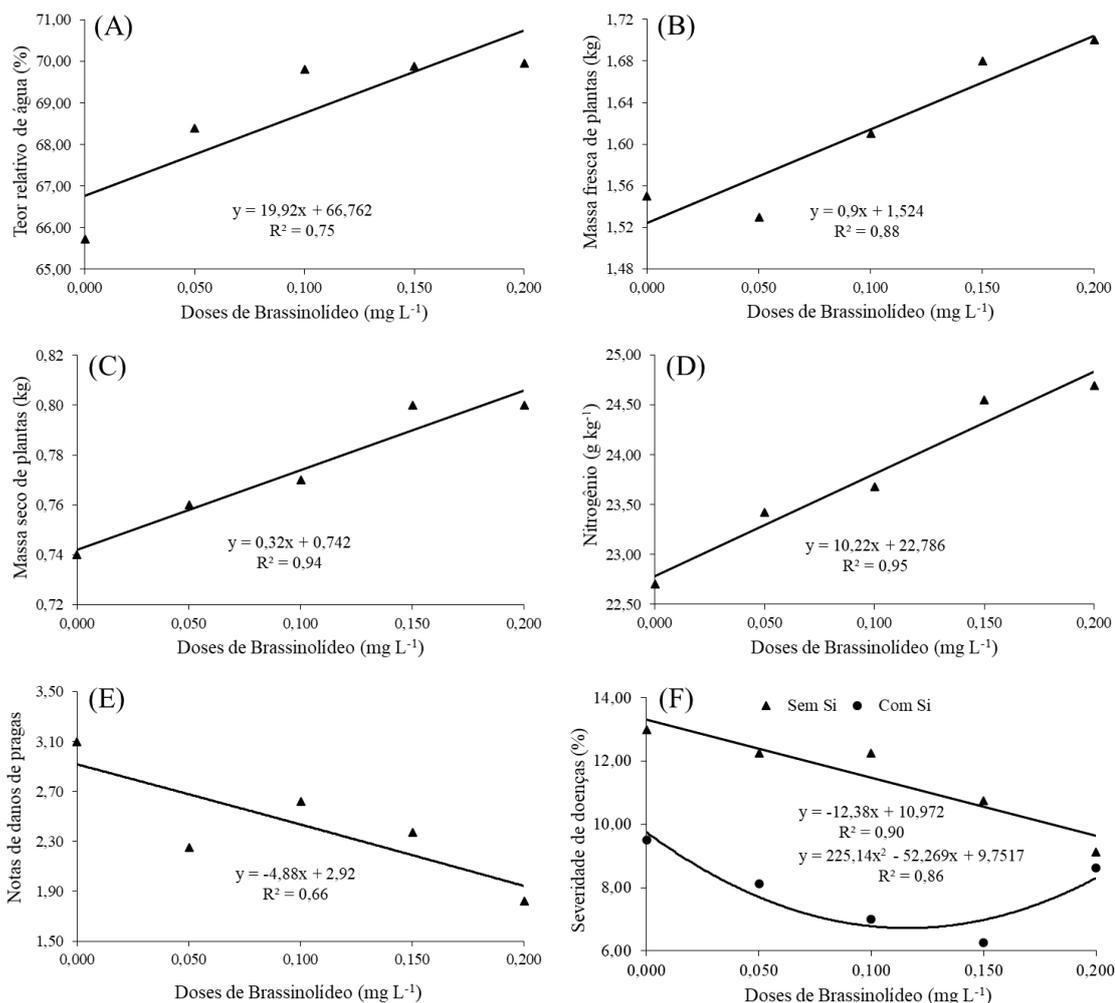


Figura 8. Regressões ajustadas para as variáveis teor relativo de água, massa fresca de plantas, massa seca de plantas, nitrogênio, notas de danos de pragas e severidade de doenças (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D, 8E e 8F, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

3.3.2.2 Componentes de rendimento

Verificou-se que a aplicação de BL proporcionou maiores produtividades de grãos, atingindo valor máximo na dose de 0,134 mg L⁻¹, com aumento de 25% em relação à testemunha. O aumento da produtividade foi determinado pelo maior número de grãos por espiga e peso de grãos (Figura 9A, 9B e 9C).

O peso dos grãos foi o componente de rendimento que mais contribuiu para o aumento de produção, com acréscimo de 15% na dose de 0,144 mg L⁻¹ (Figura 9B). Já o número de grãos por espiga aumentou 5% na dose de 0,138 mg L⁻¹ (Figura 9A). As maiores rentabilidades foram nas doses de 0,05 e 0,150 mg L⁻¹ do BL (Tabela 11). A presença de Si nas plantas também auxiliou no incremento da produtividade e diminuição na porcentagem de grãos ardidos (Tabela 11). O Si proporcionou ganho na produtividade em 8,7% com rentabilidade de 285,20 reais por hectare.

Tabela 10. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/espiga (NGE), número de fileiras por espiga (NFE), número de grãos por fileira (NGF), peso de grãos por espiga (PGE), comprimento da espiga (CE), peso de mil grãos (PMG), da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	NGE	NFE	NGF	PGE	CE	PMG
Brassinolídeo (BL)	4	*	ns	ns	**	ns	*
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		4,54	5,09	7,26	5,39	6,71	6,70
Doses de BL (mg L ⁻¹)		NGE (-)	NFE (-)	NGF (-)	PGE (g)	CE (cm)	PMG (g)
0,000		480,71	15,27	26,22	130,22	15,60	273,47
0,050		491,25	14,95	27,72	148,21	15,81	290,95
0,100		496,50	15,32	28,47	148,96	16,41	306,84
0,150		511,29	15,55	29,02	151,88	16,88	301,85
0,200		494,79	15,82	28,45	150,80	16,23	299,07
Sem Si		490,57a	15,08a	27,82a	144,23a	16,00a	295,38a
Com Si		500,05a	15,69a	28,14a	149,00a	16,38a	297,49a
Média		495,31	15,39	27,98	146,62	16,19	296,44

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de espigas (NE), percentual de grãos ardidos (GA), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	de GL	EF	NE	GA	IC	PROD	RENT
Brassinolídeo	4	ns	ns	ns	*	*	--
Silício (Si)	1	ns	ns	**	ns	*	--
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	--
C.V. (%)		5,99	7,81	61,36	4,49	4,49	--
Doses de BL (mg L ⁻¹)		EF (pls ha ⁻¹)	NE (-)	GA (%)	IC (kg pl. ⁻¹)	PROD (kg ha ⁻¹)	RENT (R\$ ha ⁻¹)
0,000		59.791	55.416	2,20	0,43	4.599	000,00
0,050		58.125	55.416	1,67	0,45	5.609	667,60
0,100		58.958	56.458	1,25	0,46	5.560	629,20
0,150		57.708	53.125	1,13	0,46	5.626	667,20
0,200		59.000	57.083	1,23	0,47	5.578	630,40
Sem Si		58.499a	54.916a	1,97b	0,45a	5.073b	0,00
Com Si		58.933a	56.083a	1,02a	0,46a	5.555a	285,20
Média		58.716	55.499	1,50	0,46	5.314	285,20

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

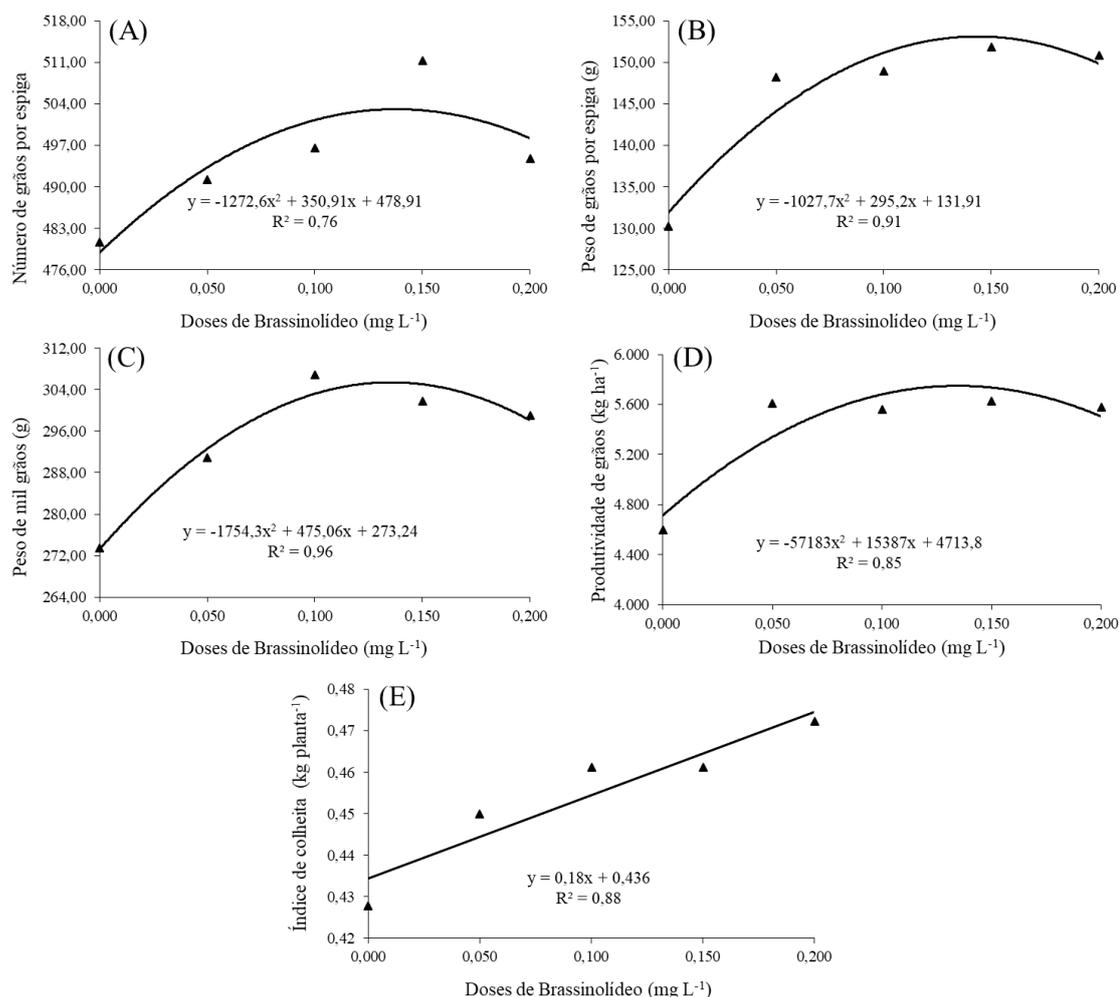


Figura 9. Regressões ajustadas para as variáveis número de grãos por espiga, peso de grãos por espiga, peso de mil grãos, produção e índice de colheita (Figuras 9A, 9B, 9C, 9D e 9E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

3.3.2.3 Variáveis fisiológicas

O conteúdo de clorofila *a* aumentou linearmente com doses crescentes de BL (Figura 10A). O maior teor de clorofila *b* foi obtido na dose de 0,152 mg L⁻¹ (22% em relação ao controle) (Figura 10B). Em relação ao carotenoide, foi observado que a interação entre o BL e Si induziram ao acréscimo linear no seu conteúdo quando comparado ao controle (Figura 10D). O Si também aumentou a quantidade de clorofila *b* nas folhas (Tabela 12). O índice de feofitinação permite inferir que ocorreu degradação de clorofilas devido a deficiência hídrica. Além disto, as doses de BL e a presença de Si, bem como a interação entre esses fatores, reduziram essa degradação (Tabela 12).

Tabela 12. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	Cl <i>a</i>	Cl <i>b</i>	Car	Clt	IF	
Brassinolídeo (BL)	4	**	*	*	**	**	
Silício (Si)	1	ns	*	ns	ns	**	
BL x Si	4	ns	ns	*	ns	**	
C.V. (%)		10,05	16,28	16,00	8,87	3,23	
Doses de BL (mg L ⁻¹)		Cl <i>a</i> (µg mL ⁻¹)	Cl <i>b</i> (µg mL ⁻¹)	Car (µg mL ⁻¹)	Clt (µg mL ⁻¹)	IF (µg mL ⁻¹)	
0,000		6,34	2,41	1,29	8,76	1,19	
0,050		7,32	2,51	1,33	9,83	1,24	
0,100		7,36	3,08	1,55	10,44	1,24	
0,150		7,98	2,91	1,66	11,89	1,25	
0,200		8,29	2,91	1,59	11,20	1,26	
Sem Si		7,35a	2,62b	1,46a	9,98a	1,22a	
Com Si		7,57a	2,91a	1,51a	10,47a	1,26b	
Média		7,46	2,76	1,49	10,22	1,15	
Doses de BL (mg L ⁻¹)							
CAR (µg mL ⁻¹)		0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
S/ Si		1,20a	1,25a	1,36a	1,55a	1,47a	1,36
C/ Si		1,38a	1,42a	1,74b	1,77a	1,72a	1,61
Média		1,29	1,34	1,55	1,66	1,60	1,49
Doses de BL (mg L ⁻¹)							
IF (µg mL ⁻¹)		0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
S/ Si		1,13b	1,23a	1,22a	1,24a	1,25a	1,21
C/ Si		1,25a	1,25a	1,26a	1,25a	1,26a	1,25
Média		1,19	1,24	1,24	1,25	1,26	1,23

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

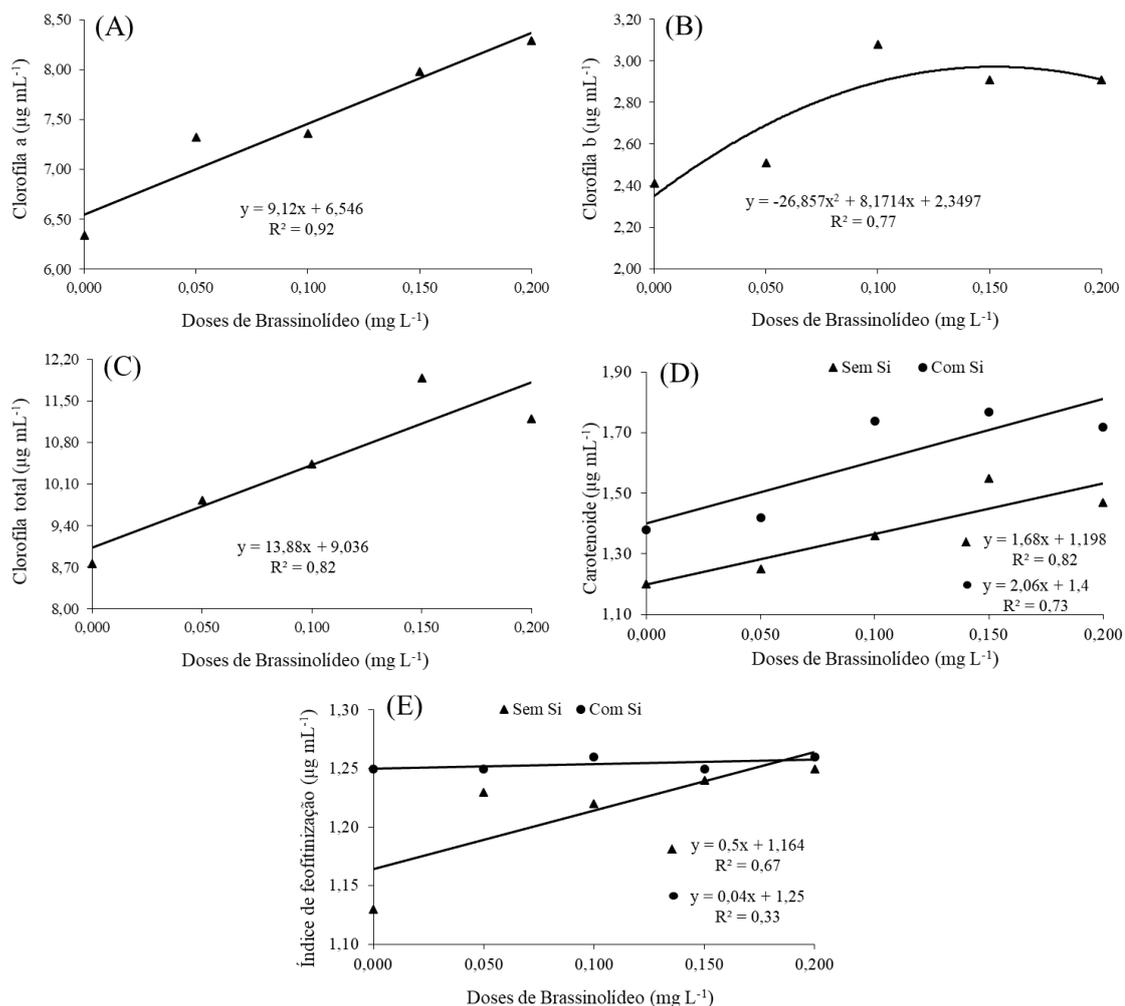


Figura 10. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total, carotenoide e índice de feofitinação (Figuras 10A, 10B, 10C, 10D e 10E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

3.3.2.4 Variáveis bioquímicas

Os estudos feitos sobre os constituintes bioquímicos permitiram constatar efeitos benéficos com o uso de BL, exceto para açúcares solúveis totais (Tabelas 13 e 14). A quantidade de açúcares redutores aumentou nas folhas com o aumento das doses de BL (Figura 11A). O amido e as proteínas tiveram seus teores aumentados até as doses de 0,142 e 0,104 mg L⁻¹, decrescendo posteriormente (Figuras 11B e 11C). Nestas doses o amido acresceu 49% e a proteína 27% em relação ao tratamento controle.

O conteúdo de MDA e a taxa de liberação de eletrólitos reduziram consideravelmente pela aplicação foliar de BL. Aplicação exógena levou ao declínio nos teores de MDA em até 22% na dose de 0,118 mg L⁻¹ (Figuras 11D e 11E).

As doses de BL promoveram alterações nas atividades das enzimas do sistema antioxidante (Tabela 14). As atividades da POD e da SOD aumentaram em função das doses do regulador (Figuras 12B e 12D) ambas com resposta linear. As atividades das

enzimas CAT e APX tiveram aumento expressivo de 34% e 61% nas doses de 0,130 e 0,168 mg L⁻¹, respectivamente (Figuras 12A e 12C). O Si não interferiu significativamente em nenhuma atividade bioquímica das células de milho (Tabelas 13 e 14).

Tabela 13. Significâncias e valores médios das variáveis açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT), taxa de liberação de eletrólitos (TLE) e malondialdeído (MDA) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	AR	AST	AM	PROT	TLE	MDA
Brassinolídeo (BL)	4	*	ns	*	*	**	**
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		24,16	17,80	11,79	17,97	4,68	10,25
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AR (%)	AST (%)	AM (%)	PROT (mg mL ⁻¹)	TLE (%)	MDA (nmol g ⁻¹ mf)
0,000		0,58	4,02	1,42	2,85	96,56	10,09
0,050		0,60	4,44	1,98	3,74	87,31	7,90
0,100		0,62	4,75	2,26	3,50	84,11	8,38
0,150		0,80	4,54	1,71	3,39	84,01	8,15
0,200		0,79	4,64	2,17	3,14	84,47	8,74
Sem Si		0,68a	4,61a	2,01a	3,17a	88,43a	8,88a
Com Si		0,68a	4,35a	1,81a	3,48a	86,15a	8,42a
Média		0,68	4,48	1,91	3,33	87,29	8,67

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

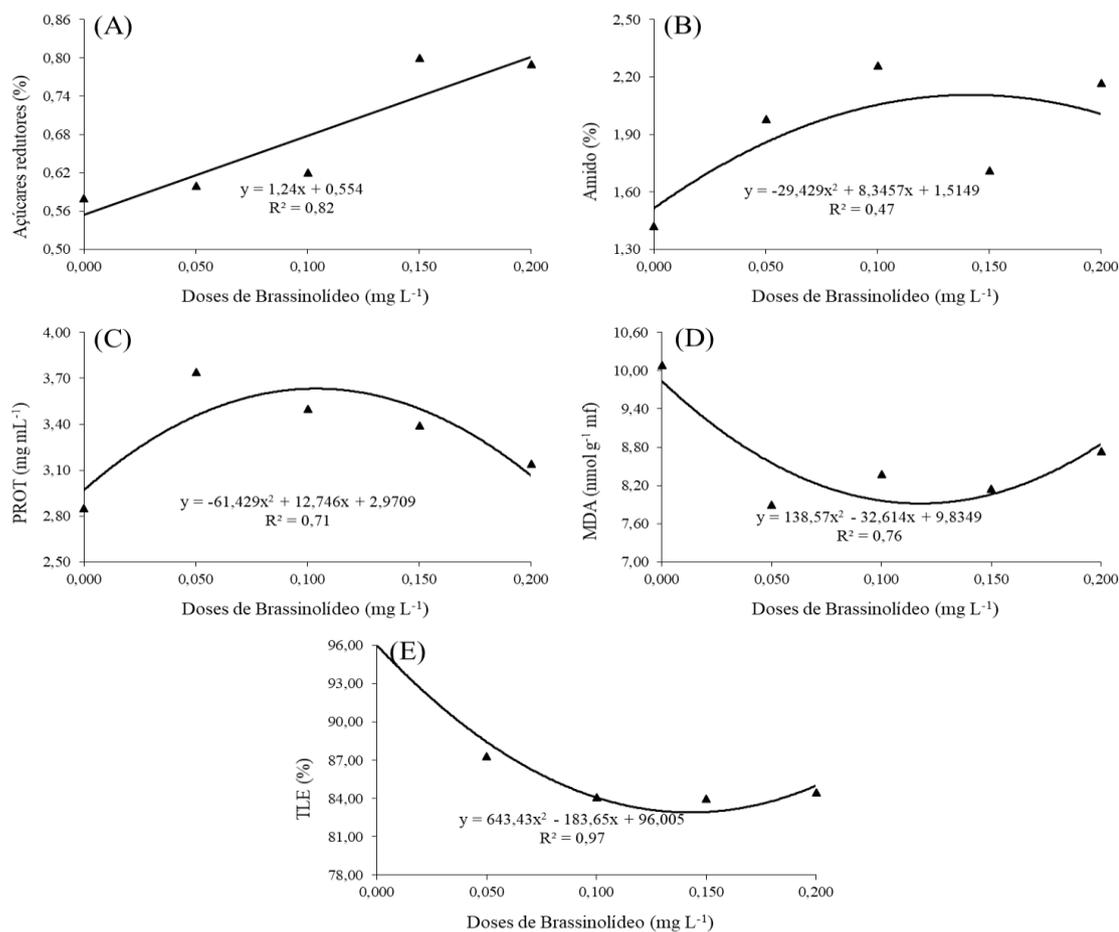


Figura 11. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, amido, proteína, malondialdeído (MDA) e taxa de liberação de eletrólitos (Figuras 11A, 11B, 11C, 11D e 11E, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Tabela 14. Significâncias e valores médios das variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do milho em função da aplicação de BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	CAT	POD	APX	SOD
Brassinolídeo (BL)	4	**	*	**	**
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		12,83	16,02	13,16	12,19
		CAT	POD	APX	SOD
Doses de BL (mg L ⁻¹)		(nmol mg ⁻¹ prot)	(μmol tetraguaicol min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	(umol ascorbato min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	(U mg ⁻¹ prot)
0,000		2,07	198,79	0,18	117,34
0,050		2,78	203,20	0,22	126,09
0,100		2,65	221,80	0,27	138,56
0,150		2,66	251,69	0,31	155,94
0,200		2,67	250,26	0,28	156,92
Sem Si		2,48a	220,12a	0,26a	137,66a
Com Si		2,65a	230,17a	0,25a	140,28a
Média		2,57	225,15	0,26	138,97

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

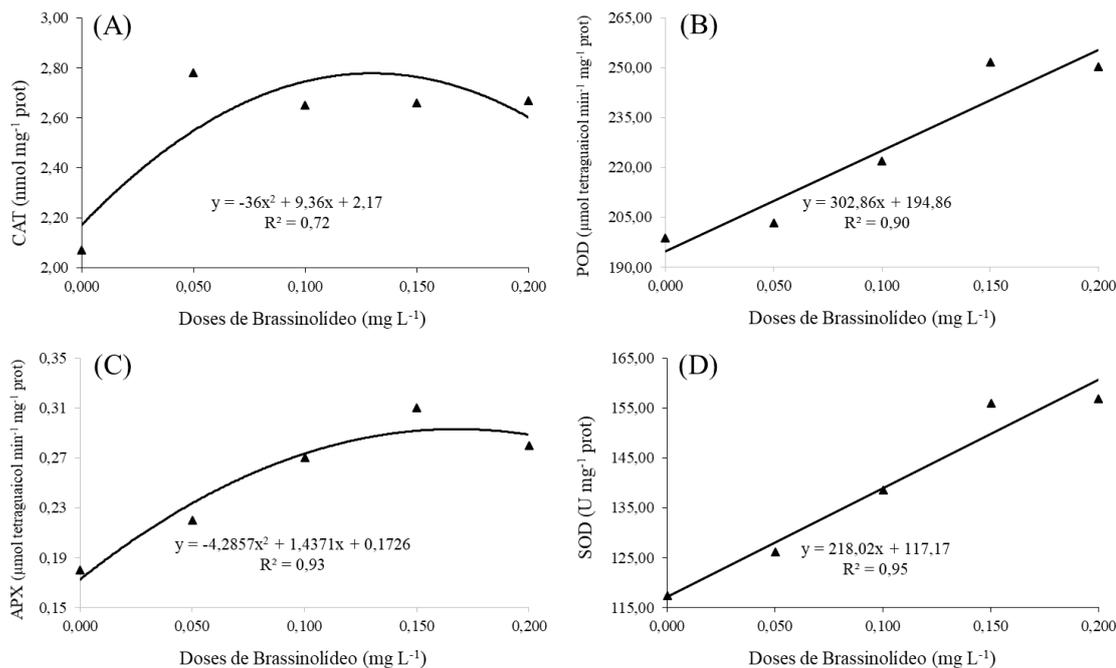


Figura 12. Regressões ajustadas para as variáveis catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) (Figuras 12A, 12B, 12C e 12D, respectivamente) na cultura do milho submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

3.4 Discussão

Reduções de produtividade da cultura do milho cultivado em sucessão à soja na região Central do Brasil, são consequências da limitação de água em estádios avançados de maturação, além da ocorrência de pragas e doenças. O período em que foi realizado o cultivo em sucessão no ano de 2015, foi caracterizado por apresentar elevada precipitação pluviométrica bem distribuída durante o ciclo da cultura. Portanto, este não foi um fator limitante ao desenvolvimento do milho (Figura 1). Esta situação é atípica para o período na região. Em 2016, as chuvas ocorreram até o início do mês de abril, cessando nos meses posteriores. Neste sentido, a cultura esteve submetida a restrição hídrica durante a maior parte do ciclo (Figura 2).

A ocorrência de déficit hídrico na cultura do milho pode ocasionar danos em todas as fases do desenvolvimento. Porém, se a deficiência ocorrer entre a pré-floração e início do enchimento de grãos, os prejuízos são maiores, pois, acometem diretamente a produtividade da cultura (Bergamaschi et al., 2006).

O aumento da produtividade no ano de 2015 com a aplicação de BL, foi determinado decisivamente pelo peso dos grãos. O fato da aplicação ter sido realizada mais tardiamente, ou seja, no estágio R2, explica o motivo da variação somente no peso dos grãos, pois as principais variáveis morfofisiológicas afetadas ou governadas pelo

fitormônio, haviam sido definidas. Neste estágio, inicia-se a acumulação de amido nos grãos, passando pela fase anterior a formação que é de açúcares, e vai até a maturação fisiológica (Sharma et al., 2017). A aplicação do BL proporcionou maior translocação de fotoassimilados para os grãos com consequente aumento no peso médio destes.

O incremento no peso de grãos pode ser justificado pela maior quantidade de pigmentos fotossintéticos. O BL regula a síntese dos pigmentos, principalmente a clorofila, e proteínas fotossintéticas (Honnerová et al., 2010). Se trata de um regulador que pode melhorar a eficiência da fixação de carbono fotossintético, aumentando a concentração interna de CO₂ disponível para as enzimas fotossintéticas (Ali et al., 2011). Neste contexto, a maior taxa de fotossintética das plantas pode estar associada ao aumento da quantidade de pigmentos, com o uso de BL (Honnerová et al., 2010; Anjum et al., 2011).

A maior quantidade de pigmentos, é possivelmente explicado pela obtenção de menores danos ao aparato fotossintético que pode ter ocorrido pelo aumento na atividade de determinadas enzimas antioxidativas quando se utilizou o BL. As atividades da CAT, APX e SOD aumentaram com o uso do regulador. Este ajustamento dos antioxidantes enzimáticos parece o resultado da regulação induzida pelo fitormônio na transcrição e tradução (Bajguz e Hayat, 2009), que ocasionou aumento nos níveis de proteínas totais e antioxidantes enzimáticos. Isto comprova que mesmo em situações em que não há deficiência hídrica severa, como ocorrido em 2015, o regulador pode influenciar a atividade enzimática, corroborando com outros resultados de pesquisa (Zhang et al., 2008; Anjum et al., 2011).

Por outro lado, a elevada precipitação em 2015, aliada a temperaturas amenas (24 a 26°C), características do período, foram determinantes a infecção e desenvolvimento de doenças foliares na cultura do milho, principalmente a pinta branca (*Phaeosphaeria maydis*), acometendo bastante a produtividade. Porém, o BL aumentou a tolerância da planta a infecção de patógenos. Segundo Bajguz e Hayat (2009), sob a influência de BR, a biossíntese de substâncias protetoras de natureza fenólica e terenoide é ativada e isto pode favorecer a proteção das plantas contra patógenos. A aplicação de 24-epibrassinolídeo em plantas de cevada diminuiu significativamente a extensão das doenças foliares induzidas por infecções fúngicas, aumentando a produtividade da cultura (Pshenichnaya et al., 1997). Também foi encontrado aumento na atividade das enzimas peroxidase e polifenoloxidase nas folhas de plantas de pepino em resposta a aplicação de BL (Khripach et al., 2000). Uma vez que estas enzimas estão

envolvidas no metabolismo dos polifenóis, uma mudança na sua atividade pode ser considerada como um dos fatores relacionados ao aumento da resistência das plantas à infecção (Xia et al., 2006).

A maior resistência da planta aos patógenos, aliado ao aumento da atividade de algumas enzimas e do conteúdo de pigmentos fotossintéticos, justificam a maior produção de fotoassimilados e conseqüentemente sua maior translocação para os grãos em formação. Conseqüentemente, o maior peso de grãos, contribuiu para aumentos significativos na produtividade. Isso demonstra que mesmo em condições em que as plantas não estão submetidas a estresse hídrico, o BL consegue promover efeitos na produtividade, como constatado em 2015.

Em 2016, o solo atingiu o ponto crítico de umidade próximo ao estágio V10. Neste estágio a planta de milho iniciava rápido e contínuo crescimento, com acumulação de nutrientes, aumento de massa seca, estendendo até os estágios reprodutivos (Bergamaschi et al., 2006). É um período, de grande demanda de água e nutrientes para satisfazer as necessidades da planta. A ocorrência de deficiência hídrica nesta fase do milho dificulta o crescimento impactando na altura das plantas, área foliar, número de espigas por planta, massa fresca e seca, por afetar as relações hídricas e as trocas gasosas (Magalhães e Durães, 2006). Desta forma, a aplicação do BL nesse período minimizou os danos deficiência hídrica.

Nitidamente, foram constatados efeitos benéficos na produtividade do milho com o uso do BL. Mesmo com ocorrência de deficiência hídrica, registrou-se aumento da produtividade de 25% em relação à testemunha. O maior número de grãos e o incremento do peso foram fatores determinantes para o aumento de produtividade do milho. Isto ocorre em razão do maior acúmulo de massa seca, que se inicia nas partes vegetativas da planta, porém, entre R₂ e R₆, há translocação gradativa para os grãos em formação. Zhang et al. (2008), também relataram que o BL aumentou o peso de grãos e a translocação de ¹⁴C das folhas para o órgão de produção. Com isto, deduz-se que o BL promoveu aumentos no número de grãos com conseqüente translocação de maior quantidade de fotoassimilados para os grãos em formação.

O incremento da produtividade de milho em 2016 com aplicação de BL é em parte atribuída as mudanças morfológicas na planta. Aumentos na altura de plantas e número de folhas, são indícios que evidenciam alterações na captação de energia luminosa resultando em maior atividade fotossintética das plantas de milho, auxiliando no aumento no número e peso de grãos. Uma importante função dos BL é o de

promover o crescimento e a divisão celular (Tong e Chu, 2016). Assim qualquer variação positiva na área foliar aumenta a formação de fotoassimilados necessários para o enchimento de grãos, proporcionando maiores produtividades.

O BL regula também, entre outros fatores, a síntese dos pigmentos e proteínas fotossintéticas. Um maior nível de clorofilas foi observado com o aumento das doses de BL, em 2016, e pode conseqüentemente induzir ao aumento da taxa fotossintética nas plantas de milho. Honnerová et al. (2010) mostraram que o aumento da taxa de fotossíntese pode ser atribuído aos aumentos observados no teor de clorofila e maior área foliar em plantas tratadas com BL. Além de manifestar o efeito positivo sobre o conteúdo de clorofilas, outra possibilidade é de prevenir a perda de pigmentos fotossintéticos, ativando enzimas que participam da biossíntese de clorofila (ou indução de síntese) (Fariduddin et al., 2009).

A degradação de pigmentos fotossintéticos, particularmente clorofilas, é um sintoma frequentemente associado a indução do estresse. A principal via de degradação é a substituição do átomo de magnésio por dois átomos de hidrogênio em decorrência do pH ácido, processo conhecido por feofitinação (Pareek et al., 2017). O índice de feofitinação permitiu constatar que a degradação de clorofilas foi menor quando se utilizou o BL, comparado com o controle. A menor degradação das clorofilas aliado ao efeito positivo de BL no conteúdo desses pigmentos fotossintéticos, pode ter influência direta no balanço da fotossíntese, resultando em maior produção de fotoassimilados.

A ocorrência de fatores bióticos, como pragas e doenças em 2016, também diminuiu a produção de fotoassimilados, afetando o enchimento de grãos de milho (Magalhães e Durães, 2006). Por ter sido um período caracterizado por pouca precipitação e baixa umidade do ar, conseqüentemente, a incidência e severidade de doenças foi menor em relação a 2015. Mesmo assim, o fitormônio reduziu a ocorrência de doenças nas plantas de milho sendo inversamente proporcional à dose de BL.

Quando as plantas são submetidas a condições de estresse, como o promovido por seca e ataque de patógenos, são produzidas várias espécies reativas de oxigênio (EROs), como o radical superóxido, o peróxido de hidrogênio e o radical hidroxilo (Gapper e Dolan, 2006). As plantas possuem um sistema de limpeza de proteção interna catalisado por enzimas, o sistema de defesa, que as recupera de espécies reativas de oxigênio, garantindo assim função celular normal (Bajguz e Hayat, 2009). Quando as plantas de milho sofreram a seca em 2016, todo o sistema defensivo foi ativado para resistir ao prejuízo do oxigênio ativo. O malondialdeído (MDA), produto da

peroxidação lipídica, apresentou maior acumulação nas plantas de milho sob condição de estresse. O aumento do conteúdo de MDA sob condições de estresse sugere que a seca induz a peroxidação lipídica da membrana por meio de EROs. No entanto, o tratamento com BL reduziu consideravelmente o conteúdo de MDA, ou seja, com o BL os níveis de danos nas membranas das células foram menores.

Da mesma forma, o uso de BL melhorou substancialmente as atividades de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. As atividades de SOD, CAT e APX, bem como conteúdo de carotenoides aumentaram com as doses de BL utilizadas. A maior atividade da SOD, possivelmente está relacionada ao mecanismo de defesa contra o aumento de superóxidos (O_2^-) promovido pelo estresse. No entanto, após a dismutação de O_2^- em H_2O_2 pela SOD, a detoxificação da célula depende ainda da ação complementar de enzimas como CAT e APX, as quais degradam o H_2O_2 , uma vez que esse subproduto também é tóxico. Neste cenário, a maior atividade dessas enzimas, observada neste estudo, com as doses de BL, funcionaram como parte de um sistema integrado na degradação de EROs.

Houve aumento de açúcares, sugerindo também uma atividade osmorregulatória desses açúcares, corroborando com outros trabalhos de pesquisa envolvendo plantas sob deficiência hídrica (Zhang et al., 2008; Singh et al., 2012). Diferentemente das situações em que o acúmulo de açúcares ocorre em função da hidrólise do amido (Maria et al. 2016), no milho houve acúmulo de amido concomitante ao aumento de açúcares. Isto indica que o aumento desses açúcares não ocorreu em função da interconversão do amido. Possivelmente esse aumento esteja relacionado a redistribuição de reservas associado à efetividade da fotossíntese.

O aumento de açúcares e das atividades enzimáticas na planta, possibilitou menores danos na função celular pelo sistema de limpeza de proteção interna. Este sistema é catalisado por enzimas, que recupera as plantas de espécies reativas de oxigênio, associado a atividade osmorregulatória desses açúcares, permitindo uma tolerância maior a fatores de estresse (Ali et al., 2011; Anjum et al., 2011). Diante disto, as plantas apresentaram melhorias no balanço hídrico das folhas, como indicado pelo aumento do teor relativo de água. Isto também explica a maior massa fresca total das plantas, ou seja, o tratamento favoreceu a retenção de água nas plantas, o que é fundamental quando se cultiva milho em sucessão.

As produtividades dos cultivos em sucessão de 2015 e 2016 mostraram uma resposta quadrática em relação as doses de BL. Alguns autores relatam o efeito positivo

do BL quando as doses são mais baixas, em torno de 0,1 mg L⁻¹ (Honnerová et al., 2010; Anjum et al., 2011). No entanto, a maioria desses estudos foram realizados com plantas cultivadas em condições ambientais controladas. Neste estudo, observou-se que as doses que proporcionaram maiores produtividades foram de 0,149 mg L⁻¹ em 2015 e 0,134 mg L⁻¹ em 2016, ambas maiores em relação as utilizadas em ambientes controlados, que são de 0,1 mg L⁻¹.

A análise econômica do cultivo de milho permitiu ainda avaliar a rentabilidade do uso de BL. Em todas as doses utilizadas nos dois anos avaliados, houve elevada rentabilidade. Em 2015, o melhor resultado foi na dose de 0,150 mg L⁻¹, já em 2016, as doses de 0,050 e 0,150 mg L⁻¹ foram mais rentáveis. Vale ressaltar que a rentabilidade foi maior em 2016, devido ao valor do milho no mercado que era em torno de R\$ 40,00, enquanto em 2015, era de R\$ 19,00 a saca de 60kg.

Além de todos os benefícios verificados com o uso do BL, a presença de Si também resultou em diminuição na ocorrência de pragas (*Spodoptera frugiperda*) e doenças em ambos os anos. Este efeito é atribuído a deposição de Si na forma de sílica gel, na parede celular da epiderme das folhas, colmos e casca (Menegale et al., 2015). Esta deposição, cria uma barreira de resistência mecânica, aumentando o fortalecimento e a rigidez da parede celular. Consequentemente há menor incidência de patógenos, aumentando a sanidade foliar e a diminuição da ocorrência de grãos ardidos.

Apesar desses benefícios proporcionados pelo Si, não foi verificado aumento significativo na produtividade em 2015. Já em 2016, o Si proporcionou maiores produtividades, gerando rentabilidade de R\$ 285 por hectare. Porém, o aumento na produtividade foi atribuído a menor incidência e severidade de pragas e doenças e menores danos metabólicos nas células. Nota-se que a atividade metabólica nos tecidos foi menos prejudicada pela presença do Si, pois a degradação de clorofila, representado pelo índice de feofitinação, foi menor. Essa degradação pode ocorrer pela formação de enzimas proteolíticas como a clorofilase, gerando danos ao aparelho fotossintético (Pareek et al., 2017).

A presença de silício também permitiu que as plantas de milho, tolerassem mais a deficiência hídrica em 2016. Isto pode ser comprovado pela maior retenção de água nas folhas. O teor relativo de água nas folhas é conhecido como medida alternativa do estado hídrico da planta, refletindo a atividade metabólica nos tecidos (Todaka et al., 2017). O silício depositado nos tecidos ajuda a amenizar o estresse

hídrico ao diminuir a transpiração e melhora a interceptação de luz, mantendo a lâmina da folha ereta (Kaya et al., 2006).

A deposição de silício na parede celular das folhas pode ter sido responsável pela menor área foliar específica das plantas de milho que foram tratadas com o nutriente. Com isto, houve aumento da espessura das folhas na presença do nutriente. Esta barreira criada pela presença do Si reduziu a incidência de patógenos na planta, e a perda de água por transpiração minimizando os prejuízos causados pelas pragas, doenças e seca.

Diante disto, pode-se afirmar que o Si proporciona menor ocorrência de pragas e doenças em plantas de milho, além de possibilitar maior retenção de água e diminuir os danos metabólicos às células. Enquanto o regulador melhora as atividades fisiológicas e metabólicas, permitindo a manutenção do potencial hídrico e o aumento das atividades de enzimas antioxidantes, diminuindo a peroxidação lipídica sob condições de déficit hídrico. Porém, o BL e Si, utilizados em plantas de milho cultivado em sucessão à soja proporciona aumentos na produtividade, com consequente rentabilidade, tanto em condições de ausência como na presença de deficiência hídrica. Com isto, BL e Si abrem novas abordagens para a tolerância das plantas as condições adversas do meio ambiente e obtenção de maiores produtividades para a cultura do milho.

3.5 Conclusões

- O BL, proporciona aumentos na produtividade tanto em condições de ausência como na presença de deficiência hídrica, em que a maior produtividade obtida foi na dose de 0,149 mg L⁻¹ com elevada precipitação pluviométrica aplicado no estágio R2 e 0,134 mg L⁻¹ em ocorrência de deficiência hídrica aplicado no estágio V10.
- A aplicação de Si e BL, resulta em diminuição na ocorrência de pragas (*Spodoptera frugiperda*) e da severidade de doenças.
- O BL e Si, utilizados em plantas de milho, aumenta a tolerância das plantas as condições adversas do meio ambiente, proporcionando maiores produtividades.

3.6 Referências Bibliográficas

ALI, Q.; ASHRAF, M. Induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) due to exogenous application of trehalose: growth, photosynthesis, water relations and oxidative defence mechanism. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 258-271, 2011.

AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; ASLAM, M.; LEE, D. J. Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. **Cereal Research Communications**, v. 44, n. 1, p. 172-185, 2016.

ANJUM, S. A.; WANG, L. C.; FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; XUE, L. L.; ZOU, C. M. J. Brassinolide Application Improves the Drought Tolerance in Maize Through Modulation of Enzymatic Antioxidants and Leaf Gas Exchange. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 197, n. 3, p. 177–185, 2011.

AZEVEDO, R. A.; ALAS, R. M.; SMITH, R. J.; LEA, P. J. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280-292, 1998.

BAJGUZ, A.; HAYAT, S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2009.

BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, H. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MULLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the qualification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 7, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

CAIRNS, J. E.; SONDER, K.; ZAIDI, P. H.; VERHULST, P. N.; MAHUKU, G.; BABU, R.; NAIR, S. K.; DAS, B.; GOVAERTS, B.; VINAYAN, M. T.; RASHID, Z.; NOOR, J. J.; DEVI, P.; VICENTE, F. S.; PRASANNA, B. M. Maize production in a changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies. **Advances in Agronomy**, v. 114, p. 1-65, 2012.

CAKMAK, I.; HORST, W. J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, v. 83, n. 3, p. 463-468, 1991.

DAVIS, F. M.; N. G, S. S.; WILLIAMS, W. P. **Visual rating scales for screening whorl-stage corn for resistance to fall armyworm**. Mississippi: Agricultural and Forest Experiment Station, 1992. 9p. (Technical bulletin, 186).

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF, 2013, 3 ed. 353p.

FARIDUDDIN, Q.; KHANAM, S.; HASAN, S. A.; ALI, B.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Effect of 28-homobrassinolide on the drought stress-induced changes in photosynthesis and antioxidant system of *Brassica juncea* L. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, n. 5, p. 889-897, 2009.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; BASRA, S. M. A.; DIN, I. U. Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**. v. 195, n. 4, p. 262-269, 2009.

FORNASIERE FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. São Paulo: FUNEP, 2007. 273p.

GAPPER, C.; DOLAN, L. Control of plant development by reactive oxygen species, **Plant Physiology**, v. 141, n. 2, p. 341-345, 2006.

HAI-HUA, W.; TAO, F.; XI-XU, P.; MING-LI, Y.; PING-LAN, Z.; XIN-KE, T. Ameliorative effects of brassinosteroid on excess manganese-induced oxidative stress in *Zea mays* L. leaves. **Agricultural Sciences in China**, v. 8, n. 9, p. 1063-1074, 2009.

HEINEMANN, A. B.; ANDRADE, C. L. D.; GOMIDE, R. L.; AMORIM, A. O.; PAZ, R. L. Padrões de deficiência hídrica para a cultura de milho (safra normal e safrinha) no estado de Goiás e suas consequências para o melhoramento genético. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 1026-1033, 2009.

HONNEROVÁ, J.; ROTHOVÁ, O.; HOLÁ, D.; KOCOVÁ, M.; KOHOUT, L.; KVASNICA, M. The exogenous application of brassinosteroids to *Zea mays* (L.) stressed by long-term chilling does not affect the activities of photosystem 1 or 2. **Journal of plant growth regulation**, v. 29, n. 4, p. 500-505, 2010.

KARMOLLACHAAB, A.; BAKHSHANDEH, A.; GHARINEH, M. H.; MORADITELAVAT, M. R.; FATHI, G. Effect of silicon application on physiological characteristics and grain yield of wheat under drought stress condition. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 1, p. 30-37, 2013.

KAYA, C.; TUNA, L.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, n. 8, p. 1469-1480, 2006.

KHRIPACH, V.; ZHABINSKII, V.; GROOT, A. Twenty years of brassinosteroids: steroidal plant hormones warrant better crops for the XXI century. **Annals of Botany**, v. 86, n. 3, p. 441-447, 2000.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; OLIVEIRA, L. A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**, Uberlândia. GPSi – ICIAG-UFU. 39p., 2004. (Boletim Técnico, 02-1ª Edição).

KRISHNA P. Brassinosteroid-mediated stress responses. **Journal of Plant Growth and Regulation**, v. 22, n. 4, p. 289-297, 2003.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da produção do milho. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 2006. 10 p. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 76).

MARIA, T.; TSANIKLIDIS, G.; DELIS, C.; NIKOLOPOULOU, A. E.; NIKOLOUDAKIS, N.; KARAPANOS, I.; AIVALAKIS, G. Gene transcript accumulation and enzyme activity of β -amylases suggest involvement in the starch depletion during the ripening of cherry tomatoes. **Plant Gene**, v. 5, p. 8-12, 2016.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M. Sistema integrado de custos agropecuários - CUSTAGRI. **Informações Econômicas**, v. 28, n. 1, p. 7-28, 1998.

MCCREADY, R. M.; GUGGOLZ, J.; SILVIERA, V.; OWENS, H. S. Determination of starch and amylose in vegetables. **Analytical Chemistry**, v. 22, n. 9, p. 1156-1158, 1950.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n. especial, p. 435-454, 2015.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato. p.71-100. 1987.

PALAZZO, A.; VERVOORT, J. M.; MASON-D'CROZ, D.; RUTTING, L.; HAVLÍK, P.; ISLAM, S.; BAYALA, J.; VALIN, H.; KADI, H. A. K.; THORNTON, P.; ZOUGMORE, R. Linking regional stakeholder scenarios and shared socioeconomic pathways: quantified west african food and climate futures in a global context. **Global Environmental Change**, v. 45, p. 227-242, 2017.

PAREEK, S.; SAGAR, N. A.; SHARMA, S.; KUMAR, V.; AGARWAL, T.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A.; YAHIA, E. M. Chlorophylls: Chemistry and Biological Functions. **Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health**, v. 1, n. 2, p. 269-284, 2017.

PSHENICHNAYA, L. A.; KHRIPACH, V. A.; VOLYNETZ, A. P.; PROKHORCHIK, R. A.; MANZHELESOVA, N. E.; MOROZIK, G. V. Brassinosteroids and resistance of barley plants to leaf diseases. In: Problems of Experimental Botany. **Belorussian Science**, Minsk. pp. 210-217, 1997.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABBOUD, A. C. S.; MACAULEY, H. R. Tolerância protoplasmática foliar à seca, em dois genótipos de caupi cultivados em campo. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, v. 22, n. 1, p. 07-14, 2002.

POSSAMAI, J. M.; SOUZA, C. M.; GALVÃO, J. C. C. Sistemas de preparo do solo para o cultivo do milho safrinha. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 79-82, 2001.

RADFORD, P. J. Growth analysis formulae: their use and abuse. In: NAKAZONO, E. M.; COSTA, M. C.; FUTATSUGI, K.; PAULILO, M. T. S. Análise comparativa de crescimento entre genótipos de pimenta cultivados em casa de vegetação. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 125-131, 2013.

ROSEGRANT, M.W.; PAISNER, M.S.; MEIJER, S.; WITCOVER, J. 2020 Global food outlook: trends, alternatives, and choices. International Food Policy Research Institute. 2001.

SHARMA, N.; KAUSHIK, M. K.; YADAV, T. K. Response of quality protein maize hybrids (*Zea mays* L.) on growth parameters under different plant population and nutrient management practices. **International Journal of Chemical Studies**, v. 5, n. 4, p. 275-277, 2017.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H.; JIAWEN, W.; SUN, H.; GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 78, p. 27-36, 2014.

SINGH, I.; KUMAR, U.; SINGH, S. K.; GUPTA, C.; SINGH, M.; KUSHWAHA, S. R. Physiological and biochemical effect of 24-epibrassinolide on cold tolerance in maize seedlings. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 18, n. 3, p. 229-236, 2012.

TODAKA, D.; ZHAO, Y.; YOSHIDA, T.; KUDO, M.; KIDOKORO, S.; MIZOI, J.; KODAIRA K.; TAKEBAYASHI, Y.; KOJIMA, M.; SAKAKIBARA, H.; TOYOOKA, K.; SATO, M.; FERNIE, A. R.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Temporal and spatial changes in gene expression, metabolite accumulation and phytohormone content in rice seedlings grown under drought stress conditions. **The Plant Journal**, v. 90, n. 1, p. 61-78, 2017.

TONG, H.; CHU, C. Reply: Brassinosteroid regulates gibberellin synthesis to promote cell elongation in rice: critical comments on Ross and Quittenden's letter. **The Plant Cell Online**, v. 28, n. 4, p. 833-835, 2016.

TRIPATHI, A.; TRIPATHI, D. K.; CHAUHAN, D. K.; KUMAR, N.; SINGH, G. S. Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: a review on current knowledge and future prospects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 356-373, 2016.

UNITED DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) World agricultural production, Circular series WAP 5-18, may 2018.

VARDHINI, B. V.; SUJATHA, E.; RAO, S. S. R. Brassinosteroids: alleviation of water stress in certain enzymes of sorghum seedlings. **Journal of Phytology**, v. 3, n. 10, p. 38-43, 2011.

VASQUEZ-TELLO, A.; ZUILY-FODIL, Y.; PHAM THI, A. T.; VIEIRA DA SILVA, J. B. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. **Journal of Experimental Botany**, n. 41, n. 7, p. 827-832, 1990.

WANG, M.; LI, Y.; YE, W.; BORNMAN, J. F.; YAN, X. Effects of climate change on maize production and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China. **Climate Research**, v. 46, n. 3, p. 223-242, 2011.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

XIA, X. J.; HUANG, Y. Y.; WANG, L.; HUANG, L. F.; YU, Y. L.; ZHOU, Y. H.; YU, J. Q. Pesticides induced depression of photosynthesis was alleviated by 24-epibrassinolide pretreatment in *Cucumis sativus* L. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 86, n. 1, p. 42-48, 2006.

XIA, X-J.; CHEN, Z.; YU, J-Q. ROS mediate brassinosteroids-induced plant stress responses. **Plant Signaling & Behavior**, v. 5, n. 5, p. 532-534, 2010.

ZHANG, M.; ZHAI, Z.; TIAN, X.; DUAN, L.; LI, Z. Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). **Plant growth regulation**, v. 56, n. 3, p. 257-264, 2008.

4. CAPÍTULO II

BRASSINOLÍDEO E SILÍCIO NA CULTURA DO SORGO GRANÍFERO

(Normas de acordo com a revista *Journal of Integrative Agriculture*)

RESUMO

A cultura do sorgo requer menos água para se desenvolver quando comparada com outros cereais, porém, disponibilidade hídrica muito baixa, afeta a obtenção de maiores produtividades de grãos. Diante disto, este estudo teve como objetivo explorar o possível papel do brassinolídeo e do silício no sorgo cultivado após a colheita da soja precoce (cultivo em sucessão). A aplicação de brassinolídeo foi realizada quando a umidade do solo de 0 – 20 cm atingiu 16%, ou seja, no ponto crítico de umidade para a cultura. Em 2015, a aplicação de BL ocorreu entre os estádios 6 e 7 (mais de 50% de floração), e em 2016 no estágio 3 (cerca de 30 dias após a emergência). As aplicações de Si foram realizadas no estágio 3 (cerca de 30 dias após a emergência) e 4 (folha bandeira visível). O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 5x2 referentes a cinco doses do brassinolídeo (0,000; 0,050; 0,100; 0,150 e 0,200 mg L⁻¹) e dois tratamentos com silício (sem e com Si). O brassinolídeo influenciou as atividades fisiológicas e metabólicas nas plantas de sorgo, permitindo assim, a manutenção do potencial hídrico e a maior atividade de enzimas antioxidantes, diminuindo a peroxidação lipídica sob condições de déficit hídrico. O efeito foi mais pronunciado sob condições de estresses. As doses que proporcionaram maiores produtividades foram de 0,200 mg L⁻¹ em 2015 com aumento de 8% e 0,193 mg L⁻¹ em 2016, com o incremento de 24%. O Si proporcionou menores danos de pragas e

severidade de doenças, além do maior status hídrico no tecido foliar diminuindo os danos metabólicos das células. Com isto, BL e Si abrem novas abordagens para a resistência das plantas de sorgo contra as condições adversas do meio ambiente, possibilitando maiores produtividades para a cultura semeada em sucessão.

Palavras-chave: Deficiência hídrica, regulador de crescimento, *Sorghum bicolor*.

ABSTRACT

Sorghum cultivation requires less water to develop compared to other cereals, but low water availability has affected the achievement of higher grain yields. The objective of this study was to explore the possible role of brassinolide (BL) and silicon (Si) in sorghum cultivation after soybean harvest. The BL application was performed when soil moisture of 0 - 20 cm reached 16%, that is, in the critical point of humidity for the crop. In 2015 the BL application occurred between stages 6 and 7 (more than 50% of flowering), and in 2016 in stage 3 (about 30 days after emergence). Si applications were performed in stage 3 (about 30 days after emergence) and 4 (visible flag leaf). The experimental design was a randomized block in a 5x2 factorial scheme for five BL doses (0.000, 0.050, 0.100, 0.150 and 0.200 mg L⁻¹) and two Si treatments (without and with Si). The BL influenced the physiological and metabolic activities in sorghum plants, allowing the maintenance of water potential and the greater activity of antioxidant enzymes, reducing lipid peroxidation under water deficit conditions. The effect was most pronounced under stress conditions. The doses that provided the highest yields were 0.200 mg L⁻¹ at the time of 2015 with an increase of 8% and 0.193 mg L⁻¹ at the end of 2016, with a 24% increase. Si provided lower pest damage and disease severity, as well as higher leaf water status, decreasing the metabolic damage of the cells. With this, BL and Si open new approaches to the resistance of sorghum plants against the adverse conditions of the environment, allowing greater yields for the crop sown in succession.

Key words: Water deficiency, Growth regulator, *Sorghum bicolor*.

4.1 Introdução

As anomalias no regime climático do nosso sistema terrestre têm levantado preocupações que refletem as mudanças climáticas globais como o estressor mais forte para a agricultura e a produção mundial de alimentos (Kersebaum e Nendel, 2014; Tripathi et al., 2016). No Brasil, o clima é o principal fator responsável pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas, principalmente em cultivos em sucessão (após a colheita da soja precoce), por ser um sistema de plantio extemporâneo e normalmente sem irrigação (Possamai et al., 2001). Neste sentido, a cultura do sorgo tem ganhado grande importância e apresentado amplo potencial para uso nos cultivos em sucessão.

Atualmente, o sorgo (*Sorghum bicolor* L.) é uma das cinco principais culturas de cereais amplamente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais do mundo (Duarte, 2012). No Brasil, vem sendo utilizado em cultivo de sucessão, após a colheita da soja, visto que é pouco exigente em pluviosidade (Martins et al., 2016). É uma cultura de grande importância para a produção de grãos utilizados como alimento humano e animal e matérias-primas industriais. Na alimentação animal, o sorgo pode substituir parcialmente o milho nas rações para aves e suínos e totalmente para ruminantes, com a vantagem de requerer menor custo de produção ou valor de comercialização de 80% do preço do milho (Duarte, 2012).

A cultura do sorgo vem ganhando espaço no sistema de produção agrícola principalmente pela capacidade de se desenvolver sobre estresse hídrico. Porém, a produtividade média de sorgo no Brasil ainda é considerada baixa, em torno de 2.863 kg ha⁻¹ de grãos (Conab, 2018). Um dos principais fatores da baixa produtividade é o fato do cultivo ser realizado no período em que as condições climáticas são desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura (Mkonda e He, 2017). O sorgo requer menos água para se desenvolver quando comparado com outros cereais, porém, mesmo a cultura sendo capaz de produzir com pouco índice pluviométrico, a produtividade de grãos também pode ser afetada em função da baixa precipitação.

A deficiência hídrica exerce influência devastadora sobre o desenvolvimento das culturas, bem como na produção agrícola (Wang et al., 2011; Cairns et al., 2012). No sorgo, quando a deficiência hídrica ocorre no florescimento, período mais crítico para a cultura, os prejuízos sobre a produtividade são mais atenuados (Ribas, 2007). O estresse hídrico pode induzir diversas respostas bioquímicas e fisiológicas em plantas, como alterações no equilíbrio hídrico, afetando a integridade das membranas e proteínas, o que, por sua vez, leva à disfunção metabólica e perda de atividades

enzimáticas (Bajguz e Hayat, 2009; Anjum et al., 2011). Existem inúmeros estudos que conferem aos reguladores do crescimento um papel muito positivo no alívio do estresse como meio de melhoramento de plantas (Farooq et al., 2009; Ali et al., 2011; Anjum et al., 2011).

Dentre os reguladores, o brassinosteróide, principalmente o brassinolídeo, vem ganhando o interesse da comunidade científica, como um meio de aumentar a resistência das plantas as condições adversas do ambiente (Zhang et al., 2008; Vardhini, 2011). O brassinolídeo é fitormônio com influência significativa a promoção do crescimento das plantas (Bajguz e Hayat, 2009). Os estudos fisiológicos e genéticos revelam as funções adicionais dele em regular uma ampla gama de processos, incluindo relação fonte/dreno, fotossíntese, senescência, germinação de sementes, florescimento, ativação enzimática, ácidos nucleicos e síntese de proteínas e respostas a estresses abióticos (Deng et al., 2007; Vardhini 2011; Ali et al., 2011) e bióticos (Krishna 2003).

Vários estudos também têm demonstrado efeitos benéficos da aplicação de Si na resistência a condições adversas, causadas por situações de estresse biótico e abiótico (Amin et al., 2015; Karmollachaab et al., 2013). Porém, o silício ainda é um elemento pouco conhecido e utilizado na agricultura brasileira (Menegale et al., 2015). Nas plantas, a presença do silício pode estar relacionada a maior resistência ao acamamento, diminuição do ataque por pragas e doenças, menor efeito deletério provocado pela geada, menor taxa de evapotranspiração, ativação da atividade de enzimas e efeitos na composição mineral. Isto ocorre em virtude das alterações na anatomia da planta, como a formação de células epidérmicas mais espessas e maior grau de lignificação e/ou silicificação, proporcionados pelo silício (Epstein e Bloom, 2005; Shi et al., 2014; Bakhat et al., 2018).

A aplicação de brassinolídeo e a utilização de silício podem ser uma estratégia para melhorar a tolerância à seca em plantas de sorgo podendo resultar em menores perdas de produtividade e aumento na renda dos agricultores no período em que o ambiente é marcado por insuficiência hídrica na fase reprodutiva da cultura. Com isto, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos do brassinolídeo e do silício na cultura do sorgo cultivado após a colheita da soja precoce (cultivo em sucessão).

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Informações Gerais

O trabalho foi conduzido a campo, após a colheita da soja precoce, nos anos de 2015 e 2016, no município de Ipameri-GO ($17^{\circ}67'90''S$, $48^{\circ}19'59''W$ e altitude de 805 m), caracterizado por possuir clima Aw, segundo a classificação de Köppen, com duas estações bem definidas: a chuvosa, de outubro a abril, e a seca, compreendida de maio a setembro. As variações de temperatura média do ar e precipitação e umidade do solo durante a condução do experimento estão apresentadas na Figura 1 e 2.

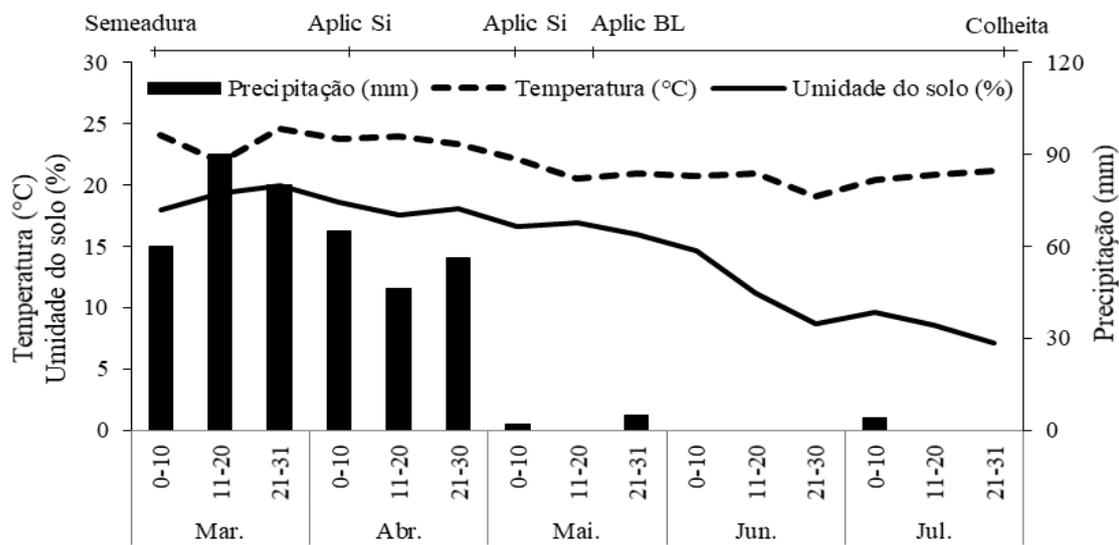


Figura 1. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro de 2015 a julho de 2015, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).

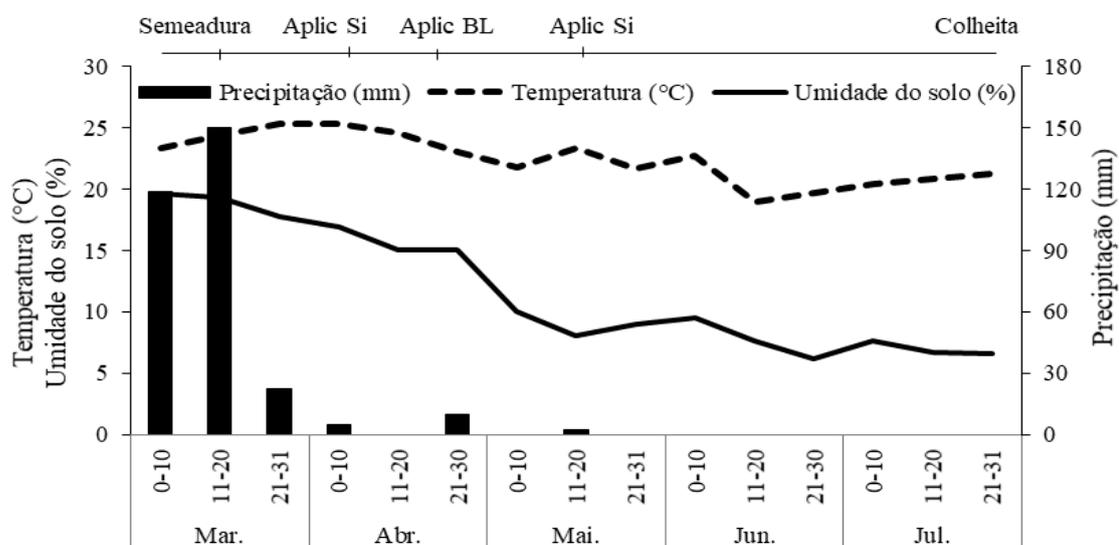


Figura 2. Variação mensal da temperatura média do ar, umidade média do solo e precipitação de fevereiro de 2016 a julho de 2016, Ipameri-GO. (Fonte: Temperatura na estação climatológica de Ipameri-GO, precipitação e umidade do solo coletados na Fazenda Panorama).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-amarelo (Embrapa Solos, 2013). Os resultados da análise química da amostra de solo da área experimental em 2015 foram caracterizados por pH em CaCl₂: 5,6; Ca, Mg, K, Al, H+Al e CTC: 2,4; 1,1; 0,16; 0,0; 2,2 e 5,9 em cmol_c dm⁻³, respectivamente; P: 4,2 mg dm⁻³; saturação de bases: 62%, matéria orgânica: 21,00 g dm⁻³. Em 2016, foram caracterizados por pH em CaCl₂: 5,5; Ca, Mg, K, Al, H+Al e CTC: 2,3; 1,3; 0,16; 0,01; 2,4 e 6,16 em cmol_c dm⁻³, respectivamente; P: 4,6 mg dm⁻³; saturação de bases: 61%, matéria orgânica: 22,00 g dm⁻³; argila, silte e areia: 530; 150 e 320 g kg⁻¹, respectivamente em ambos os anos.

Foi realizada a análise físico-hídrica do solo de 0,0 – 0,2 m de profundidade para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRA). O resultado da análise na área experimental foi caracterizado por apresentar a θ_{CC} (capacidade de campo em 10KPa): 0,203 kg/kg e θ_{PMP} (ponto de murcha permanente em 1.500 KPa): 0,125 kg/kg. Com os resultados da curva de retenção de água no solo, foi então determinado o ponto de umidade crítica do solo para a cultura do milho. A umidade crítica calculada foi de 0,160 kg/kg, equivalente a 16% de umidade na camada de 0,0 - 0,2 m de profundidade.

Foi utilizado o cultivar de sorgo Agroceres 1060, nos anos de 2015 e 2016, após a colheita da soja precoce. A semeadura do sorgo foi realizada nos dias 10 e 15 de março em 2015 e 2016, respectivamente.

4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso em esquema fatorial 5x2 referentes a cinco doses do regulador brassinolídeo (BL) (0,000; 0,050; 0,100; 0,150 e 0,200 mg L⁻¹) e dois tratamentos com silício (Si) (sem e com, em aplicação foliar).

As parcelas experimentais foram compostas de seis linhas de 6,0 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m. A área útil foi obtida considerando as quatro linhas centrais desconsiderando 0,5 m de cada extremidade (10 m²). Em todas as aplicações foi utilizado pulverizador costal pressurizado por CO₂, munido de barra com duas pontas de pulverização do tipo cônico vazio (Jacto JA) com psi de aproximadamente 100 libras e volume de calda de 200 L ha⁻¹.

O regulador utilizado foi um análogo do brassinosteróide ($C_{28}H_{48}O_6$) (brassinolídeo) da marca comercial SIGMA[®], dissolvido em etanol para obter a solução estoque. Posteriormente foi feita a diluição em água destilada para as concentrações de acordo com os tratamentos adotados. As plantas que não receberam o regulador foram pulverizadas apenas com água destilada. O silício utilizado foi o Protect Bugram, proveniente de rochas fossilizadas de algas marinhas, constituído principalmente de óxido de silício (SiO_2) com 94,6% de Si. Foi utilizado $2,0 \text{ kg ha}^{-1}$, seguindo recomendações do produto.

A aplicação de BL foi feita quando a umidade do solo de 0 – 20 cm atingia 16%, ou seja, no ponto crítico de umidade para a cultura do sorgo, calculado a partir do resultado da análise de CRA. Desta forma, em 2015 a aplicação de BL ocorreu, entre os estádios 6 e 7 (mais de 50% de floração) e em 2016, no estádio 3 (cerca de 30 dias após a emergência). As aplicações de Si foram realizadas no dia 05 de abril no estádio 3 e 10 de maio de 2015 no estádio 4 (folha bandeira visível). Em 2016 as aplicações de silício foram em 09 de abril (estádio 3) e 15 de maio (estádio 4).

Uma semana antes da implantação do experimento foi realizada a dessecação das plantas daninhas aplicando-se, mecanicamente, o equivalente a $1.240 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ de glyphosate e $0,5 \text{ L ha}^{-1}$ de 2,4 D em um volume de calda de 100 L ha^{-1} . A adubação e o plantio foram realizados com semeadora de dezesseis linhas em que foram empregadas populações de 200.000 semente ha^{-1} e adubação equivalente a 150 kg do formulado 10-20-15. Aos 15 dias após a emergência (DAE), foi aplicado $850 \text{ g i.a ha}^{-1}$ do herbicida atrazina (volume de calda de 100 L ha^{-1}) para o controle de plantas voluntárias de soja e plantas daninhas dicotiledôneas. Para controle de lagartas (*Spodoptera frugiperda*) foi feita somente uma aplicação do inseticida metomil ($0,8 \text{ L ha}^{-1}$) juntamente com o herbicida atrazina. Decorridos 30 DAE, foram aplicados, manualmente, ao lado da linha de semeadura do sorgo, 100 kg ha^{-1} de nitrogênio na forma de ureia. Não houve aplicação de fungicida justamente para verificar os efeitos que o BL e o Si poderiam exercer sobre a incidência de patógenos.

Para avaliar o efeito da aplicação de BL e do Si na cultura do sorgo, foram analisadas as variáveis morfológicas, fisiológicas, bioquímicas, agrônômicas e econômicas de todos os tratamentos.

4.2.3 Monitoramento da umidade do solo

Duas amostras de solo (50 g) da área experimental foram coletadas de três em três dias, desde a implantação do experimento, nas profundidades de 0,0 a 0,2 m, utilizando-se trado holandês. Após as coletas, as amostras foram pesadas para obtenção da massa de solo úmido e, em seguida, levadas para estufa a 105°C por 48 horas para a determinação da massa seca. Quando a determinação hídrica no solo atingiu o ponto crítico, foi então, realizada a aplicação de brassinolídeo na cultura do milho, em ambos os experimentos.

4.2.4 Variáveis fisiológicas

Foram utilizadas amostras da terceira folha completamente expandida a partir do ápice, sendo avaliadas em dez plantas por parcela. As avaliações de pigmentos cloroplastídicos foram feitas aos 15 dias após a aplicação foliar de brassinolídeo.

O conteúdo de pigmentos cloroplastídicos foi determinado por meio da extração com dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com CaCO_3 . Três discos foliares de massa fresca, com 5 mm de diâmetro, foram incubados em DMSO em tubos vedados e envolvidos com papel alumínio por um período de 24 horas a 65°C. Posteriormente a absorbância do extrato foi determinada por meio de espectrofotômetro. Alíquotas foram retiradas para leitura espectrofotométrica a 480, 649 e 665 nm. O conteúdo de clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*) e carotenoides (Car) foram determinados seguindo a equação proposta por Wellburn (1994) e a degradação da clorofila avaliada pelo índice de feofitinação ($\text{IF} = A_{435}/A_{415}$).

4.2.5 Variáveis bioquímicas

Amostras da terceira folha completamente expandida, a partir do ápice, foram coletadas às 12 h, embrulhadas em papel alumínio e imersas em nitrogênio líquido. As variáveis foram realizadas aos 15 dias após a aplicação foliar de BL, sendo avaliadas 10 plantas por parcela. Para as variáveis bioquímicas, foram determinadas:

a) Enzimas envolvidas no metabolismo antioxidativo e proteínas: um grama desse material foi homogeneizado em 3 mL de solução tampão de fosfato de sódio (0,05 M, pH 7,8, EDTA 1 mM e PVP 2% p/v). O homogeneizado foi centrifugado e o sobrenadante (extrato bruto) foi utilizado para determinar as atividades da dismutase do superóxido (SOD), da catalase (CAT), peroxidase do ascorbato (APX) e peroxidase de

guaiacol (POD), segundo Azevedo et al. (1998), além da determinação do teor de proteína.

b) Determinação do conteúdo de proteínas solúveis totais: determinação a partir de 25 μ L de extrato obtido pela trituração de material vegetal fresco (folhas), que foi misturado ao reativo (Coomassie Blue G 250 preparado com ácido fosfórico e etanol) para realização de leitura da absorvância no espectrofotômetro a 595 nm (Bradford, 1976).

c) Peroxidação de lipídios: a determinação de malondialdeído (MDA) foi realizada segundo metodologia proposta por Cakmak e Horst (1991), obtido por homogeneização de 0,3 g de folhas em 2 mL de TCA, centrifugada e adicionada 1,5 mL de TBA. Em seguida as amostras foram lidas em espectrofotômetro em absorvância de 532 nm, sendo os resultados expressos em nmol MDA g^{-1} de massa fresca.

d) Permeabilidade de membranas: avaliada pela liberação de eletrólitos (TLE) de discos de folhas imersos em 30 mL de água destilada em tubos de ensaio, segundo metodologia descrita por Vasquez-Tello et al. (1990) e Pimentel et al. (2002).

e) Amido e açúcares solúveis totais e redutor: aproximadamente 200 mg de tecido foliar foi imerso em etanol 80% e aquecido a 65°C por 30 minutos. O extrato foi centrifugado e o sobrenadante coletado em novo tubo. Realizou-se três lavagens do material vegetal para obtenção do extrato final. O extrato etanólico foi utilizado para determinação dos açúcares solúveis totais, redutores. O resíduo sólido da extração foi seco em estufa a 65°C durante 72 horas. Posteriormente foi utilizado para a determinação do teor de amido. As determinações dos teores de açúcares e amido foram realizadas utilizando espectrofotômetro. Para a quantificação de açúcares solúveis totais foi empregado o método fenol-sulfúrico com leitura realizada em comprimento de onda de 490 nm (Dubois et al., 1956) utilizando curva padrão de sacarose. Os açúcares redutores foram determinados conforme método do ácido dinitrosalicílico segundo recomendações de Miller (1959), com leitura em comprimento de onda de 540 nm e utilizando curva padrão de glicose. O amido foi determinado segundo McCready et al. (1950) em comprimento de onda de 490 nm e curva padrão de sacarose em intervalo de 0 a 50 μ g.

4.2.6 Variáveis morfológicas

As análises agronômicas foram realizadas ao final do ciclo da cultura. Já as avaliações do teor relativo de água foram feitas aos 15 dias após a aplicação do brassinolídeo.

a) Análises agronômicas: foram mensuradas a altura da planta, diâmetro do colmo, área foliar, massa fresca e seco da parte aérea e número de folhas por planta. A altura de planta (medição do nível do solo até a inserção da última folha) e diâmetro de colmo (medição do nível do solo no segundo nó). A área foliar foi obtida através das medidas de comprimento e largura de folhas. Foram avaliadas dez plantas por parcela para cada característica agronômica.

b) Teor relativo de água na folha: foram retirados cinco discos foliares de 12 mm de diâmetro cada, pesados e colocados por 4 horas para saturar em placas de petri com água destilada. Em seguida, os discos foram novamente pesados e colocados para secar à temperatura de 70°C por 72 horas, sendo posteriormente obtida a massa seca em gramas.

c) Área foliar específica: Foram retirados seis discos foliares de 12 mm de diâmetro de folhas totalmente expandidas que posteriormente foram secos em estufa a 70°C por 72 horas, para determinação da massa seca. A área foliar específica foi obtida através da equação proposta por Radford (2013).

4.2.7 Severidade de doenças e danos de pragas

A severidade de doenças e danos de pragas foram avaliados no estágio 8 (grão pastoso), pela análise de dez plantas escolhidas ao acaso, em cada parcela. Para a severidade de doenças, a avaliação foi obtida pela quantificação do percentual de área foliar lesionada, atribuindo valores de 0 a 100%. Para os danos de pragas foi atribuída nota ao dano provocado pelas lagartas de acordo com a escala de nota estabelecida por Davis e Williams (1992).

4.2.8 Teor de silício e nitrogênio na planta

A determinação do Si na planta foi feita aos 20 dias após a aplicação do brassinolídeo em dez folhas por parcela segundo metodologia proposta por Korndorfer

et al. (2004). O teor de nitrogênio foi determinado conforme Bezerra Neto e Barreto (2011).

4.2.9 Componentes de produtividade

A colheita foi realizada manualmente, na área útil de cada parcela. Posteriormente, foram avaliadas as demais variáveis: número de grãos por panícula, peso de mil grãos, peso de grãos por panícula (pesagem média dos grãos de dez panículas por parcela), comprimento da panícula (medição do comprimento de dez panículas), produtividade de grãos (pela pesagem dos grãos de todas plantas da área útil da parcela) e índice de colheita (relação da biomassa do órgão de interesse pela biomassa total em dez plantas por parcela). Para determinação da produtividade e do peso de mil grãos foi feita correção da umidade de grãos para 13%.

4.2.10 Análise econômica

A análise econômica foi realizada para todos os tratamentos com estimativa da renda bruta total, renda líquida operacional, margem bruta, índice de lucratividade, preço e produtividade de equilíbrio, segundo metodologia proposta por Martin et al. (1998).

4.2.11 Análises estatísticas

A análise estatística foi efetuada para todas variáveis citadas anteriormente. Para as fontes de variação testadas, foi empregado o teste de Tukey a 5% de probabilidade para a comparação das médias da aplicação de silício e análise de regressão para comparação das médias das doses de brassinolídeo.

4.3 Resultados

4.3.1 Experimento sorgo em 2015

4.3.1.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e severidade de doenças

Em 2015, o BL promoveu diferenças significativas somente na altura de plantas e no teor de nitrogênio das folhas de sorgo (Tabelas 1 e 2). Os resultados permitiram comprovar maior altura de plantas e teor de nitrogênio nas folhas em todas as doses utilizadas em relação à testemunha, com ponto máximo para altura de plantas, correspondente a 0,140 mg L⁻¹ representando aumento de 5% em relação à testemunha (Figuras 3A e 3B). O Si aumentou o diâmetro do colmo, o número de folhas das plantas

de sorgo e o teor de Si na folha (Tabela 1). Nota-se também que o Si contribuiu para a redução dos danos causados pelas pragas e severidade de doenças (Tabela 2).

Tabela 1. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), área foliar específica (AFE) e teor relativo de água (TRA) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	AP	DC	NF	AF	AFE	TRA
Brassinolídeo (BL)	4	*	ns	ns	ns	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	**	**	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		4,92	4,10	4,25	3,34	5,73	10,40
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AP (cm)	DC (mm)	NF (-)	AF (cm ²)	AFE (cm ² g ⁻¹)	TRA (%)
0,000		66,17	20,8	9,00	458,35	235,45	62,26
0,050		68,29	21,9	9,10	444,93	237,68	70,61
0,100		68,76	20,9	8,75	443,38	233,72	63,39
0,150		69,43	21,7	8,87	450,18	235,08	67,98
0,200		68,73	21,5	9,00	436,85	239,90	68,43
Sem Si		67,84a	20,6b	8,73b	445,18a	238,19a	66,50a
Com Si		68,71a	22,1a	9,16a	448,29a	234,54a	68,57a
Média		68,28	21,4	8,95	446,73	236,37	67,54

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 2. Significâncias e valores médios das variáveis massa fresca (MF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	PF	PS	Si	N	DP	SD
Brassinolídeo (BL)	4	ns	ns	ns	*	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	**	ns	**	**
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		9,06	17,45	27,72	7,93	28,24	4,36
Doses de BL (mg L ⁻¹)		PF (kg)	PS (kg)	Si (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	DP (--)	SD (%)
0,000		1,262	0,479	3,46	21,68	0,58	31,25
0,050		1,268	0,493	2,82	24,27	0,42	29,93
0,100		1,393	0,493	3,20	24,10	0,62	30,43
0,150		1,318	0,499	3,06	24,13	0,55	31,33
0,200		1,231	0,481	3,25	24,91	0,48	30,50
Sem Si		1,270a	0,483a	2,59b	23,74a	0,72a	32,16a
Com Si		1,280a	0,495a	3,72a	23,90a	0,35b	29,22b
Média		1,285	0,489	3,46	21,68	0,54	30,69

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

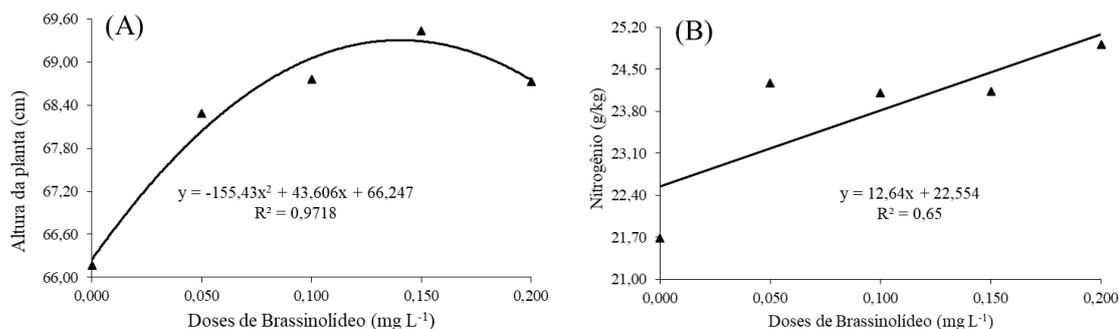


Figura 3. Regressões ajustadas para as variáveis altura de plantas e nitrogênio (Figuras 3A e 3B, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

4.3.1.2 Componentes de rendimento

Constatou-se que a aplicação de BL na fase inicial de enchimento de grãos, proporcionou aumento linear na produtividade do sorgo nas doses utilizadas (Figura 4C). Porém, a produtividade elevou em até 8% em relação à testemunha na maior dose de BL testada. O aumento na produtividade foi proporcionado pelo peso de grãos. A interação entre BL e Si foi significativa para o peso de grãos por panícula com aumento de até 43% na maior dose utilizada, quando comparado a testemunha (Figura 4A). O peso de mil grãos foi maior com a elevação das doses de BL (Figura 4B). Diante disto, o tratamento mais rentável foi obtido na dose mais elevada do BL testada. Em relação ao Si, foi possível constatar que não houve influência significativa destes nos componentes do rendimento da cultura do sorgo (Tabelas 3 e 4). Porém, mesmo não proporcionando aumento significativo na produtividade, seu uso proporcionou rentabilidade 36,75 reais por hectare em relação à testemunha.

Tabela 3. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/panícula (NGP), peso de grãos/panícula (PGP), comprimento da panícula (CP) e peso de mil grãos (PMG) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	NGP	PGP	CP	PMG	
Brassinolídeo (BL)	4	ns	**	ns	*	
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	
BL x Si	4	ns	*	ns	ns	
C.V. (%)		10,78	9,29	11,12	8,97	
Doses de BL (mg L ⁻¹)		NGP (--)	PGP (g)	CP (cm)	PMG (g)	
0,000		1.110	29,9	26,2	26,9	
0,050		1.196	32,0	28,6	27,3	
0,100		1.166	37,8	28,1	30,3	
0,150		1.162	37,7	27,5	28,8	
0,200		1.178	37,4	27,4	30,7	
Sem Si		1.160a	34,8a	27,3a	28,5a	
Com Si		1.165a	35,1a	27,8a	29,2a	
Média		1.164	34,9	27,6	28,9	
Doses de BL (mg L ⁻¹)						
PGP (g)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	30,12a	32,73a	36,87a	34,90b	34,13b	33,75
Com Si	29,72a	31,43a	38,85a	40,49a	40,69a	36,24
Média	29,92	32,08	37,86	37,69	37,41	34,99

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de panículas (NP), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	EF	NP	IC	PROD	RENT
Brassinolídeo (BL)	4	ns	ns	ns	*	--
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	--
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	--
C.V. (%)		0,98	1,00	8,83	7,18	--
Doses de BL (mg L ⁻¹)		EF (pls ha ⁻¹)	NP (-)	IC (kg pl ⁻¹)	PROD (kg ha ⁻¹)	RENT (R\$ ha ⁻¹)
0,000		200.458	191.166	58,9	5.625	00,00
0,050		199.208	189.999	63,1	5.627	-05,12
0,100		198.791	190.000	65,0	5.918	49,00
0,150		200.041	191.041	62,5	5.961	53,50
0,200		199.208	190.416	61,5	6.036	63,62
Sem Si		199.250a	190.750a	61,9a	5.659a	00,00
Com Si		199.833a	190.500a	62,4a	6.008a	36,75
Média		199.541	190.625	62,2	5.833	18,38

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

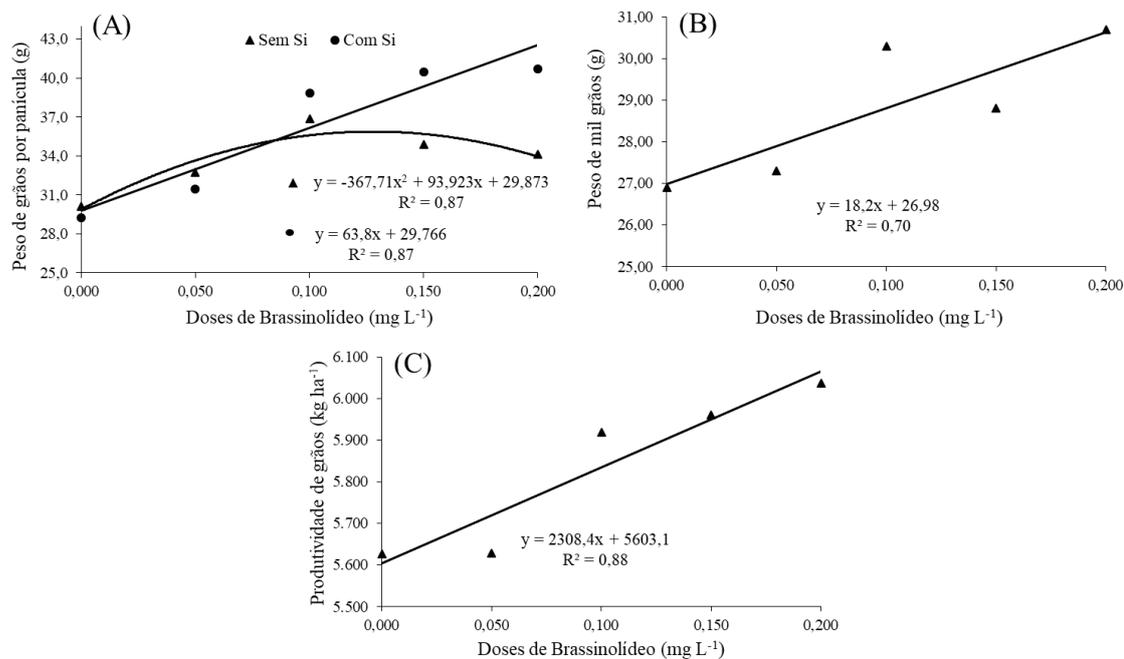


Figura 4. Regressões ajustadas para as variáveis peso de grãos por panícula, peso de mil grãos e produtividade (Figuras 4A, 4B e 4C, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

4.3.1.3 Variáveis fisiológicas

A aplicação do regulador aumentou o conteúdo de pigmentos fotossintético nas plantas de sorgo com ajuste linear para clorofila *a*, *b* e total e quadrático para o conteúdo de carotenoide (Figura 5A, 5B, 5C e 5D). A interação entre os fatores também influenciou o aumento linear no teor de clorofila *a* e total no sorgo (Figuras 5A e 5D). Houve aumento de 16% no conteúdo de carotenoide na dose de 0,136 mg L⁻¹. Os resultados com Si permitiram constatar maiores conteúdos de clorofila *b* e total nas plantas de sorgo (Tabela 5).

Tabela 5. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila a (Cl a), clorofila b (Cl b), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de GL	Cl a	Cl b	Car	Clt	IF	
Brassinolídeo	**	**	**	**	ns	
Silício (Si)	ns	**	ns	*	ns	
BL x Si	*	ns	ns	*	ns	
C.V. (%)	7,74	11,77	6,01	7,46	4,40	
Doses de BL (mg L ⁻¹)	Cl a (µg mL ⁻¹)	Cl b (µg mL ⁻¹)	Car (µg mL ⁻¹)	Clt (µg mL ⁻¹)	IF (µg mL ⁻¹)	
0,000	5,00	1,26	1,39	6,26	1,22	
0,050	5,65	1,34	1,55	6,99	1,21	
0,100	5,70	1,54	1,62	7,25	1,20	
0,150	5,78	1,81	1,59	7,58	1,19	
0,200	6,17	1,80	1,59	7,97	1,18	
Sem Si	5,55a	1,46b	1,52a	7,01b	1,20a	
Com Si	5,77a	1,63a	1,57a	7,41a	1,19a	
Média	5,56	1,55	1,55	7,21	1,19	
Doses de BL (mg L ⁻¹)						
Cl a (µg mL ⁻¹)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	4,73a	5,60a	5,32b	5,65a	5,68b	5,40
Com Si	5,28a	5,70a	6,07a	5,91a	6,66a	5,92
Média	5,00	5,65	5,69	5,78	6,17	5,66
Doses de BL (mg L ⁻¹)						
Clt (µg mL ⁻¹)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	5,94a	6,86a	6,93b	7,32a	7,37b	6,88
Com Si	6,58a	7,14a	7,56a	7,83a	8,57a	7,54
Média	6,26	7,00	7,25	7,58	7,97	7,21

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

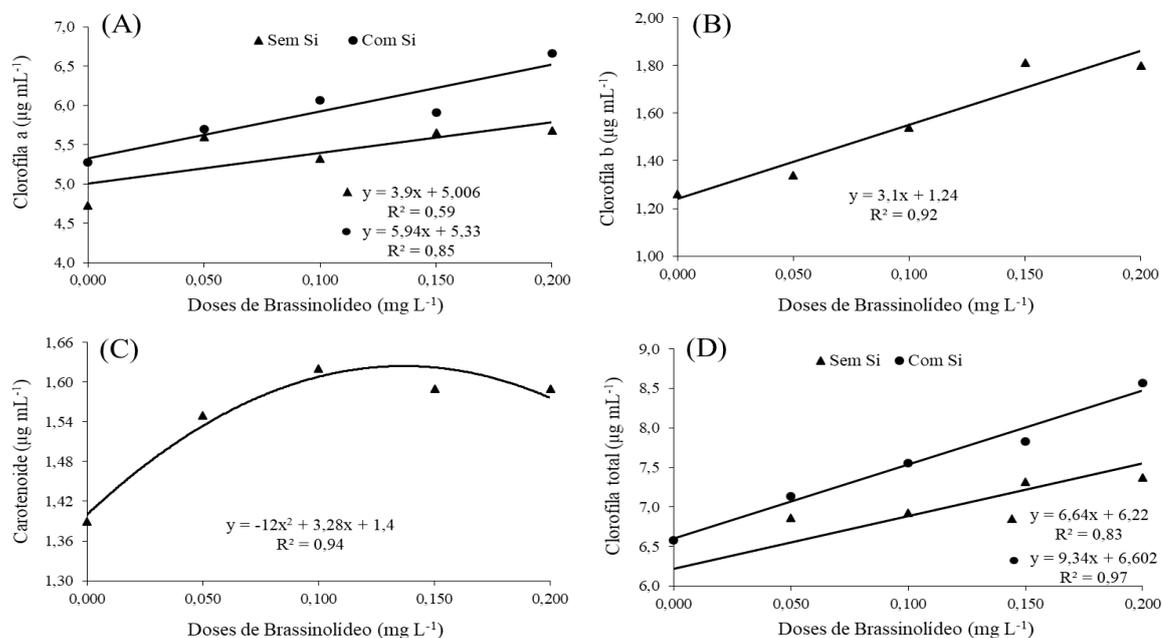


Figura 5. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila a, clorofila b, carotenoide e clorofila total (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO.

4.3.1.4 Variáveis bioquímicas

A aplicação de BL proporcionou aumento significativo somente para os açúcares redutores, CAT, POD e SOD (Tabelas 6 e 7). Neste aspecto, o conteúdo de açúcares redutores foi crescendo nas folhas com o aumento das doses até 0,131 mg L⁻¹ (Figura 6A). Já as enzimas responderam com acréscimo linear na atividade a medida que as doses de BL aumentaram (Figuras 6B, 6C e 6D). A interação entre os tratamentos foi significativa apenas para SOD, pois, observou-se maior atividade da enzima com a aplicação de Si à medida que as doses de BL aumentavam (Figura 6D). O Si interferiu significativamente apenas na quantidade de proteínas das células de sorgo (Tabelas 6 e 7).

Tabela 6. Significâncias e valores médios das variáveis de açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT) e taxa de liberação de eletrólitos (TLE) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	AR	AST	AM	PROT	TLE	MDA
Brassinolídeo (BL)	4	*	ns	ns	ns	ns	ns
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	*	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		18,50	17,01	15,33	18,04	4,64	14,38
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AR (%)	AST (%)	AM (%)	PROT (mg mL ⁻¹)	TLE (%)	MDA (nmol g ⁻¹ mf)
0,000		0,79	2,81	1,87	1,29	85,10	16,03
0,050		0,89	2,66	1,84	1,31	87,38	15,23
0,100		1,06	2,86	1,87	1,40	84,71	13,79
0,150		1,01	2,89	1,94	1,50	84,36	14,72
0,200		0,96	2,94	1,85	1,49	86,65	15,07
Sem Si		0,90a	2,80a	1,87a	1,31b	85,40a	14,72
Com Si		0,99a	2,87a	1,88a	1,48a	85,89a	15,22
Média		0,95	2,84	1,88	1,40	85,65	14,97

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 7. Significâncias e valores médios das variáveis malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

Fontes de variação	GL	CAT	POD	APX	SOD	
Brassinolídeo (BL)	4	**	*	ns	**	
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	
BL x Si	4	ns	ns	ns	*	
C.V. (%)		17,25	16,25	27,05	18,47	
Doses de BL (mg L ⁻¹)	CAT (nmol mg ⁻¹ prot)	POD (μmol tetraguaicol min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	APX (umol ascorbato min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	SOD (U mg ⁻¹ prot)		
0,000	1,59	201,60	0,27	157,24		
0,050	2,09	226,55	0,29	222,52		
0,100	2,09	233,53	0,27	206,87		
0,150	2,18	244,14	0,30	186,92		
0,200	2,59	263,92	0,30	265,13		
Sem Si	2,08a	229,22a	0,29a	214,89a		
Com Si	2,14a	238,68a	0,29a	200,58a		
Média	2,11	233,95	0,29	207,74		
SOD (U mg ⁻¹ prot)	Doses de BL (mg L ⁻¹)					
	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	177,35a	210,70a	203,60a	171,06a	218,54b	196,25
Com Si	137,13a	234,35a	210,12a	202,78a	311,72a	219,22
Média	157,24	222,53	206,86	186,92	265,13	207,74

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

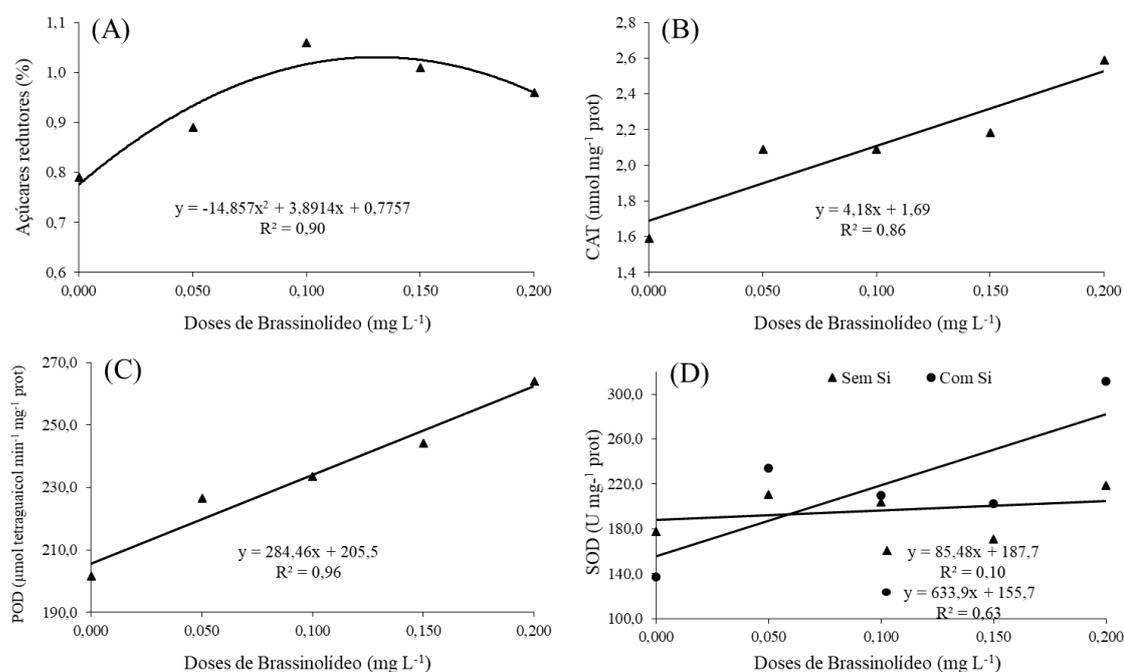


Figura 6. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, catalase (CAT), peroxidase do guiacol (POD) e superóxido dismutase (SOD) (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2015.

4.3.2 Experimento sorgo em 2016

4.3.2.1 Variáveis morfológicas, nutricionais, pragas e severidade de doenças

As observações feitas em relação aos parâmetros morfológicos indicaram que os tratamentos com BL no estágio vegetativo, promoveram maior crescimento e desenvolvimento das plantas de sorgo. De acordo com a análise de variância (Tabela 8) foi constatado que o BL induziu o crescimento das plantas de sorgo com aumento mais pronunciado na dose de 0,124 mg L⁻¹ (Figura 7A). O teor relativo de água na folha, assim como a massa fresca e massa seca de plantas, variaram em relação as crescentes doses de BL (Figuras 7B, 7C e 7D). O teor de nitrogênio nas folhas seguiu uma resposta quadrática com aumento de 9% em relação à testemunha na dose equivalente a 0,128 mg L⁻¹ (Figura 7E).

Os resultados indicaram que plantas tratadas com BL tiveram valores mais baixos de danos promovidos por pragas, em função do aumento das doses até 0,154 mg L⁻¹ correspondente a redução de 30% em relação à testemunha (Figura 7F). Com o Si foi possível constatar maiores diâmetro do colmo, teor relativo de água nas folhas e massa fresca das plantas (Tabelas 8 e 9). O Si também proporcionou menores danos promovidos por pragas e doenças em plantas de sorgo e maior acúmulo de Si na folha (Tabela 9).

Tabela 8. Significâncias e valores médios das variáveis altura da planta (AP), diâmetro do colmo (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), área foliar específica (AFE) e teor relativo de água (TRA) do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	AP	DC	NF	AF	AFE	TRA
Brassinolídeo (BL)	4	**	ns	ns	ns	ns	*
Silício (Si)	1	ns	*	ns	ns	ns	*
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		2,60	7,55	4,41	8,63	3,10	1,36
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AP (cm)	DC (mm)	NF (-)	AF (cm ²)	AFE (cm ² g ⁻¹)	TRA (%)
0,000		59,75	14,48	8,46	165,50	212,44	80,46
0,050		64,02	14,96	8,85	163,58	214,12	83,96
0,100		63,91	14,73	8,83	161,99	211,40	84,63
0,150		65,35	14,23	8,66	168,83	210,49	84,79
0,200		63,15	14,77	8,88	161,49	217,09	84,30
Sem Si		63,13a	14,16b	8,74a	164,47a	212,78a	81,85b
Com Si		63,34a	15,11a	8,74a	164,08a	213,43a	83,61a
Média		63,23	14,64	8,74	164,27	213,11	82,73

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 9. Significâncias e valores médios das variáveis massa fresca (PF), massa seca (MS) de plantas, teor de silício (Si) e nitrogênio (N) nas folhas, notas de danos de pragas (DP), severidade de doença (SD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	PF	PS	Si	N	DP	SD
Brassinolídeo (BL)	4	*	*	ns	*	**	ns
Silício (Si)	1	*	ns	*	ns	**	**
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		5,86	8,42	24,42	5,99	18,95	16,31
Doses de BL (mg L ⁻¹)		PF (kg)	PS (kg)	Si (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	DP (--)	SD (%)
0,000		0,62	0,33	3,06	16,80	1,62	5,17
0,050		0,68	0,37	3,17	17,52	1,37	5,26
0,100		0,67	0,37	3,21	18,48	1,15	4,89
0,150		0,67	0,38	3,16	18,03	1,16	4,73
0,200		0,69	0,37	3,25	17,85	1,16	4,48
Sem Si		0,65b	0,37a	2,86b	17,88a	1,14b	5,59a
Com Si		0,68a	0,38a	3,48a	17,59a	1,45a	4,23b
Média		0,67	0,38	3,17	17,74	1,30	4,91

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

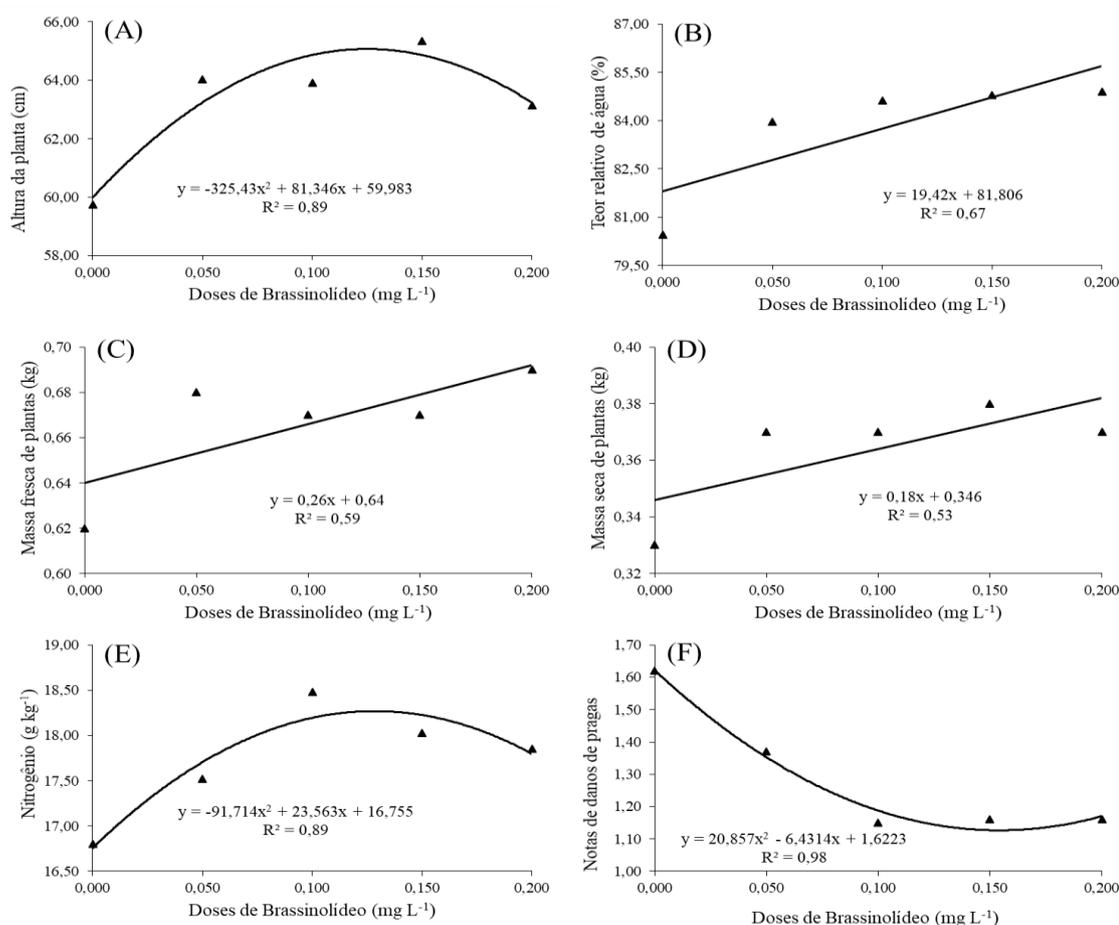


Figura 7. Regressões ajustadas para as variáveis altura de planta, teor relativo de água, massa fresca de plantas, massa seca de plantas, nitrogênio e notas de danos de pragas (Figuras 7A, 7B, 7C, 7D, 7E e 7F, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

4.3.2.2 Componentes de rendimento

Os resultados permitiram constatar que a aplicação de BL proporcionou acréscimo significativo na produtividade de grãos para todas as doses utilizadas, com ponto de máximo na dose de 0,193 mg L⁻¹, correspondente ao incremento na produtividade em torno de 24% (Figura 8E). Este aumento foi determinado pelo número de grãos por panícula e peso destes grãos (Figuras 8A e 8B). O peso dos grãos aumentou linearmente com doses de BL, assim como o peso de mil grãos que teve comportamento semelhante (Figuras 8B e 8D). O número de grãos por panícula proporcionou aumento de 21% na dose de 0,161 mg L⁻¹ (Figura 7B). A maior rentabilidade foi obtida com a dose do BL que proporcionou maior produtividade. A presença de Si nas plantas também ajudou a inferir no aumento de produtividade do sorgo em 10%, com rentabilidade de 114,60 reais por hectare (Tabela 11).

Tabela 10. Significâncias e valores médios das variáveis número de grãos/panícula (NGP), peso de grãos/panícula (PGP), comprimento da panícula (CP) e peso de mil grãos (PMG) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	NGP	PGP	CP	PMG
Brassinólídeo (BL)	4	*	**	*	*
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		15,96	21,26	6,01	7,47
Doses de BL (mg L ⁻¹)		NGP (--)	PGP (g)	CP (cm)	PMG (g)
0,000		677	12,5	20,6	19,95
0,050		778	13,1	22,3	21,26
0,100		791	16,0	21,7	22,99
0,150		823	17,3	22,3	22,55
0,200		820	18,1	22,1	23,21
Sem Si		770a	15,3a	20,5a	20,28a
Com Si		790a	16,4a	22,0a	21,30a
Média		780	15,9	21,3	20,79

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Significâncias e valores médios das variáveis estande final de plantas (EF), número de panículas (NP), índice de colheita (IC), produtividade (PROD) e rentabilidade (RENT) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	EF	NP	IC	PROD	RENT
Brassinólídeo (BL)	4	ns	ns	*	**	--
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	*	--
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	--
C.V. (%)		2,77	4,57	15,85	7,08	--
Doses de BL (mg L ⁻¹)		EF (pls ha ⁻¹)	NP (-)	IC (kg pl ⁻¹)	PROD (kg ha ⁻¹)	RENT (R\$ ha ⁻¹)
0,000		197.083	191.875	26,6	2.792	000,00
0,050		200.000	196.666	27,9	2.978	086,70
0,100		197.291	190.833	29,2	3.253	219,00
0,150		199.166	197.083	30,5	3.457	315,60
0,200		199.375	197.291	30,8	3.370	266,40
Sem Si		197.749a	194.500a	28,1a	3.029b	000,00
Com Si		199.416a	195.000a	29,4a	3.331a	114,60
Média		198.583	194.750	28,8	3.180	57,30

***, *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

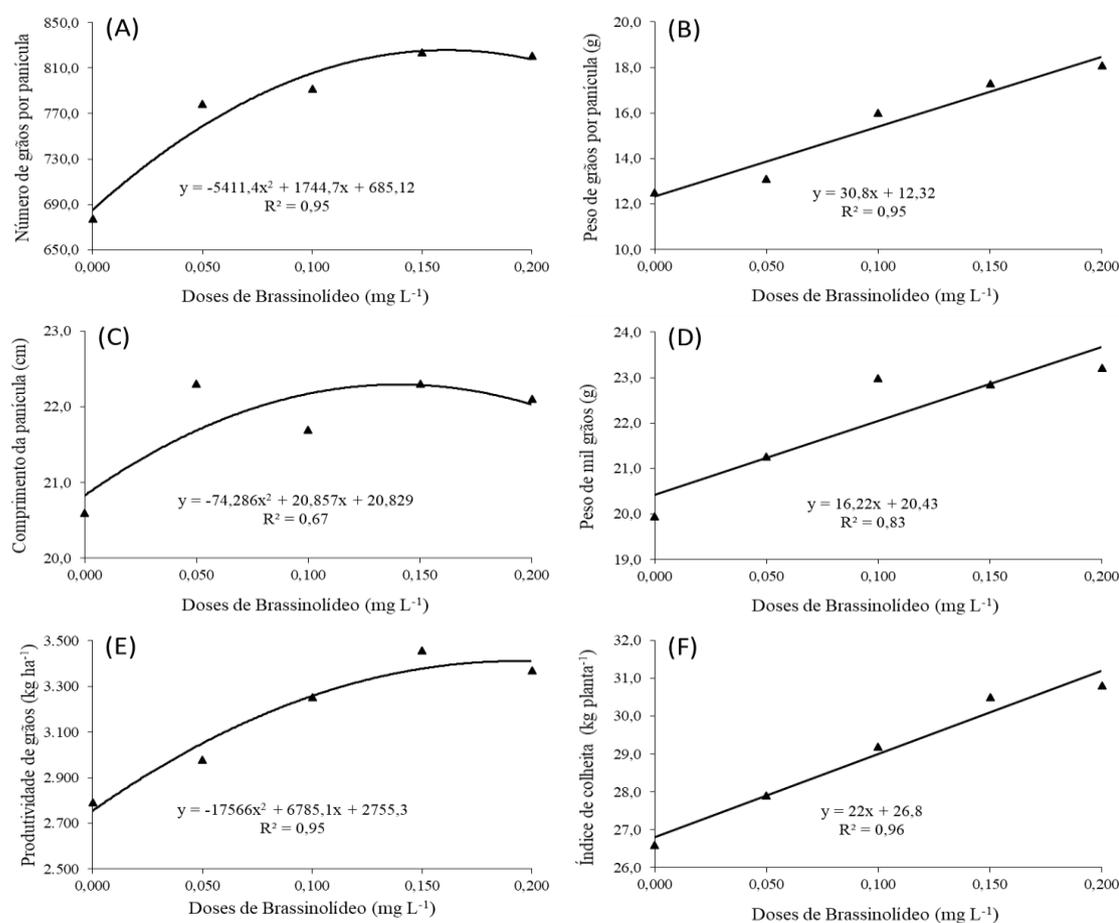


Figura 8. Regressões ajustadas para as variáveis número de grãos por panícula, peso de grãos por panícula, comprimento da panícula, peso de mil grãos, produtividade e índice de colheita (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D, 8E e 8F, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

4.3.2.3 Variáveis fisiológicas

Os resultados do teor de pigmento do cloroplasto permitiram concluir que o BL teve um efeito significativo sobre os teores de clorofila e carotenoides (Tabela 12). Os conteúdos de clorofila *a* e total tiveram aumentos mais pronunciados nas doses de 0,096 e 0,092 mg L⁻¹, na presença de Si, sendo 17 e 11% maior em relação às plantas controle, respectivamente (Figuras 9A e 9C). Um padrão semelhante foi observado para o conteúdo de carotenoides, que aumentou 35% em relação ao controle (Figura 9B). O Si também aumentou a quantidade de clorofila *a*, *b* e total nas folhas (Tabela 12).

Tabela 12. Significâncias e valores médios das variáveis clorofila *a* (Cl *a*), clorofila *b* (Cl *b*), carotenoides (Car), clorofila total (Clt) e índice de feofitinação (IF) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	Cl <i>a</i>	Cl <i>b</i>	Car	Clt	IF
Brassinolídeo	4	**	ns	*	*	ns
Silício (Si)	1	**	**	ns	**	ns
BL x Si	4	**	ns	ns	**	ns
C.V. (%)		11,17	14,62	18,31	10,65	4,90
Doses de BL (mg L ⁻¹)		Cl <i>a</i> (µg mL ⁻¹)	Cl <i>b</i> (µg mL ⁻¹)	Car (µg mL ⁻¹)	Clt (µg mL ⁻¹)	IF (µg mL ⁻¹)
0,000		4,11	1,52	0,88	5,65	1,26
0,050		5,12	1,59	0,94	6,72	1,23
0,100		4,88	1,52	1,03	6,40	1,24
0,150		4,71	1,58	0,99	6,29	1,23
0,200		4,91	1,67	1,23	6,58	1,23
Sem Si		4,27b	1,46b	0,97a	5,74b	1,24a
Com Si		5,22a	1,70a	1,05a	6,93a	1,23a
Média		4,75	1,58	1,01	6,34	1,24
Doses de BL (mg L ⁻¹)						
Cl <i>a</i> (µg mL ⁻¹)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	3,78a	3,84b	4,46a	4,43a	4,85b	4,20
Com Si	4,45a	6,40a	5,30a	5,00a	4,98a	5,23
Média	4,12	5,12	4,88	4,72	4,92	4,72
Doses de BL (mg L ⁻¹)						
Clt (µg mL ⁻¹)	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200	Média
Sem Si	5,10b	5,24b	5,85a	5,97a	6,51b	5,73
Com Si	6,19a	8,20a	6,97a	6,62a	6,65a	6,93
Média	5,65	6,72	6,41	6,30	6,58	6,33

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

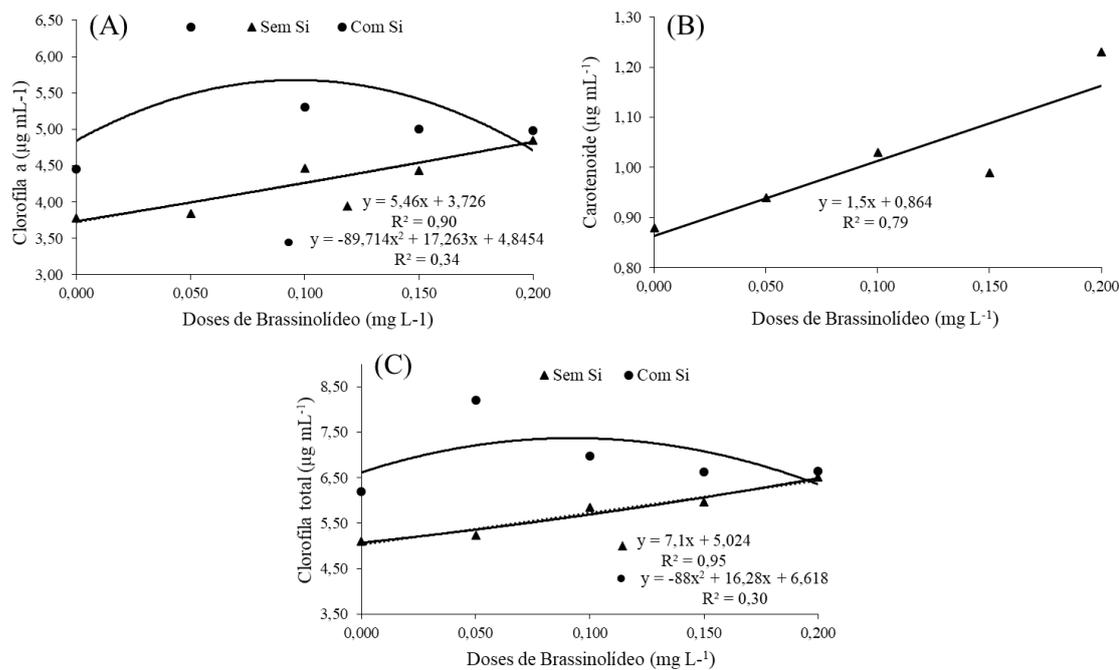


Figura 9. Regressões ajustadas para as variáveis clorofila a, carotenoídeo e clorofila total (Figuras 9A, 9B e 9C, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

4.3.2.4 Variáveis bioquímicas

O conteúdo de açúcares redutores, amido e proteínas, também tiveram seus valores aumentados com as doses de BL (Figuras 10A, 10B e 10C). O conteúdo de MDA e a taxa de liberação de eletrólitos reduziram consideravelmente pela aplicação foliar de BL (Figuras 10D e 10E). As doses de BL também promoveram alterações na atividade das enzimas do sistema antioxidante (Tabela 16). A atividade da CAT, POD e SOD aumentaram em função das doses do regulador (Figuras 10F, 10G e 10H) com resposta linear ao aumento das doses. O Si aumentou a atividade da enzima APX, e diminuiu o conteúdo de MDA nas folhas de sorgo (Tabelas 15 e 16).

Tabela 13. Significâncias e valores médios das variáveis de açúcares redutores (AR), açúcares solúveis totais (AST), amido (AM), proteína (PROT) e taxa de liberação de eletrólitos (TLE) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	AR	AST	AM	PROT	TLE	MDA
Brassinolídeo (BL)	4	*	ns	*	*	*	**
Silício (Si)	1	ns	ns	ns	ns	ns	*
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		16,41	14,40	11,15	20,52	3,34	8,52
Doses de BL (mg L ⁻¹)		AR (%)	AST (%)	AM (%)	PROT (mg mL ⁻¹)	TLE (%)	MDA (nmol g ⁻¹ mf)
0,000		0,76	2,26	1,67	1,09	94,13	20,44
0,050		0,86	2,28	1,76	1,27	92,89	18,06
0,100		0,89	2,51	1,79	1,44	92,33	18,41
0,150		0,90	2,62	1,98	1,31	89,33	15,93
0,200		1,05	2,62	1,99	1,60	90,96	15,85
Sem Si		0,85 a	2,43 a	1,78 a	1,29 a	92,04a	17,20 b
Com Si		0,93 a	2,49 a	1,90 a	1,40 a	92,16a	18,28 a
Média		0,89	2,46	1,84	1,35	92,1	17,74

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 14. Significâncias e valores médios das variáveis malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD), ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD) da cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

Fontes de variação	GL	CAT	POD	APX	SOD
Brassinolídeo (BL)	4	**	**	ns	**
Silício (Si)	1	ns	ns	**	ns
BL x Si	4	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		12,63	15,63	28,49	18,29
Doses de BL (mg L ⁻¹)		CAT (nmol mg ⁻¹ prot)	POD (μmol tetraguaicol min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	APX (umol ascorbato min ⁻¹ mg ⁻¹ prot)	SOD (U mg ⁻¹ prot)
0,000		2,58	226,30	0,23	192,05
0,050		3,29	270,16	0,34	251,89
0,100		3,62	291,26	0,35	255,93
0,150		4,82	306,18	0,34	293,95
0,200		3,91	318,35	0,36	292,35
Sem Si		3,61a	273,48a	0,28b	251,79 a
Com Si		3,68a	291,42a	0,37a	260,67 a
Média		3,65	282,45	0,33	256,23

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

**; *, ns: significativo a 1 e a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pelo teste F.

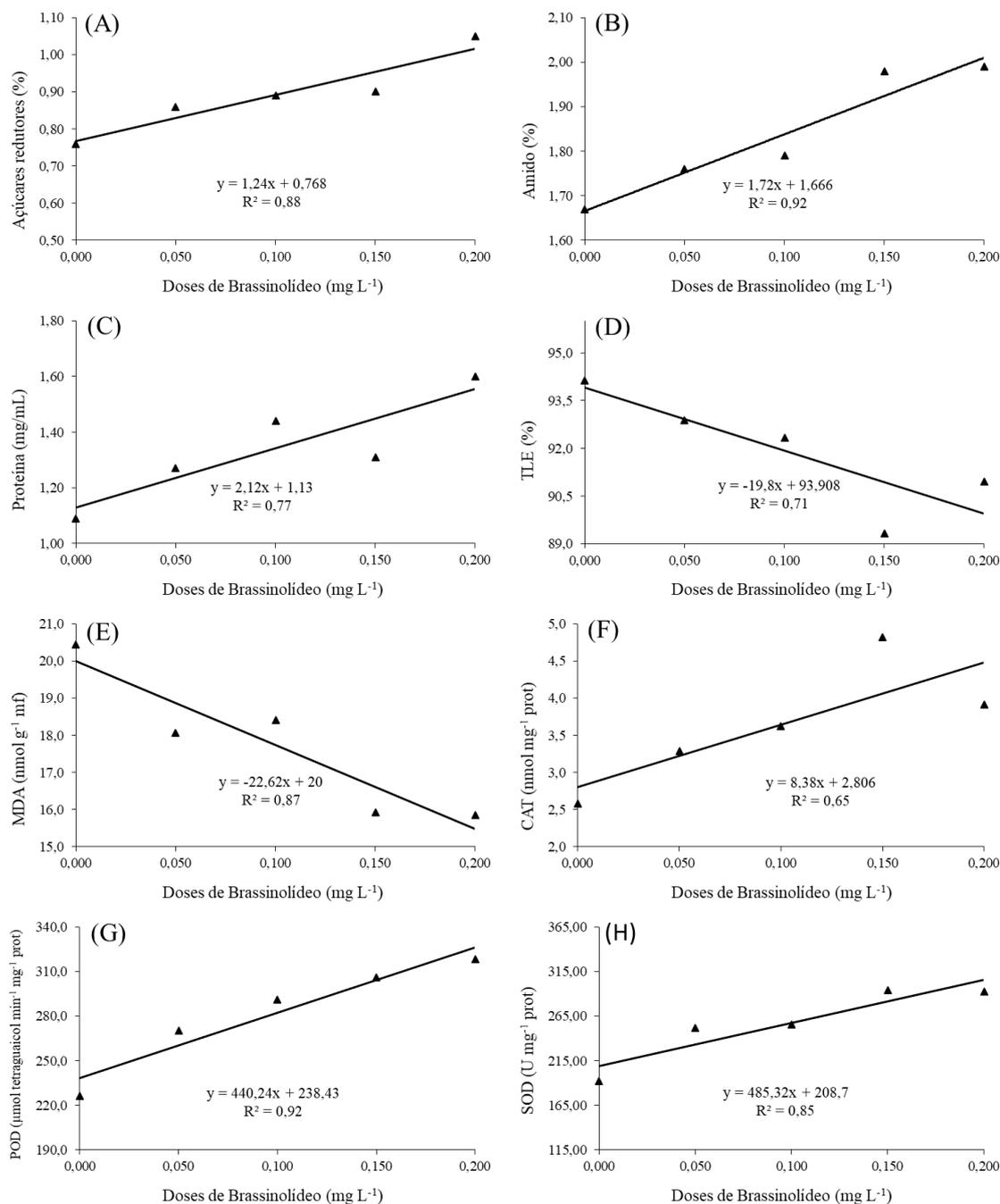


Figura 10. Regressões ajustadas para as variáveis açúcares redutores, amido, proteína, taxa de liberação de eletrólitos (TLE), malondialdeído (MDA), catalase (CAT), peroxidase do guaiacol (POD) e superóxido dismutase (SOD) (Figuras 10A, 10B, 10C, 10D, 10E, 10F, 10G e 10H, respectivamente) na cultura do sorgo submetido a BL e Si, Ipameri-GO, 2016.

4.4 Discussão

As reduções de produtividade da cultura do sorgo cultivado em sucessão à soja, são consequências da limitação hídrica principalmente no florescimento, além da ocorrência de pragas e doenças (Ribas, 2007).

Em 2015, no período em que é realizado os cultivos em sucessão, houve elevadas precipitações pluviométricas bem distribuídas até o período de florescimento

do sorgo, uma situação atípica para o período na região (Figura 1). Com isto, o suprimento hídrico para a cultura do sorgo foi suficiente para garantir pleno desenvolvimento e elevadas produtividades. Por outro lado, em 2016, houve deficiência hídrica severa com chuvas ocorrendo até o início do mês de abril, cessando nos meses posteriores. Neste sentido, em 2016, a cultura do sorgo esteve submetida a restrição hídrica durante a maior parte do ciclo (Figura 2).

Em 2015, pôde-se constatar que o BL influenciou de forma positiva a produtividade da cultura do sorgo sob condições de elevada precipitação. O BL é conhecido por aumentar a produtividade de diversas culturas como o milho, a soja, o trigo, dentre outras (Zhang et al., 2008; Anjum et al., 2011; El-Feky e Abo-Hamad, 2014). A produtividade respondeu de forma linear ao aumento das doses e pode ter sido determinada pelo maior peso de grãos. Isto indica que houve maior quantidade de assimilados produzidos pelas plantas de sorgo que por fim, foram translocados para os grãos em formação.

A maior produção de assimilados, pode ser explicada pelo aumento no conteúdo de pigmentos fotossintéticos. Estes desempenham função importante na fotossíntese, sendo as clorofilas responsáveis pela captação de energia luminosa nas plantas (Wellburn, 1994). O BL pode prevenir a perda de pigmentos fotossintéticos, ativando enzimas que participam da biossíntese de clorofila (ou indução de síntese), (Fariduddin et al., 2009). O aumento da quantidade de pigmentos fotossintéticos, com o uso de BL, pode estar associado a maior taxa fotossintética das plantas (Honnerová et al., 2010; Anjum et al., 2011). Todo esse envolvimento nos componentes fotossintéticos promovidos pelo BL, influenciou diretamente na produtividade da cultura do sorgo em 2015.

A atividade de enzimas como a CAT, POD e SOD, também foram maiores com o aumento das doses de BL. Alguns trabalhos relatam a eficiência do regulador em aumentar a atividade enzimática até mesmo em plantas irrigadas (Zhang et al., 2008; Anjum et al., 2011). Mesmo em condições normais de crescimento, muitos processos metabólicos produzem espécies reativas de oxigênio (EROs) em plantas, como superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o radical hidroxilo (OH) (Sudhakar et al., 2001). Qualquer produção de EROs pode ter se formado nas plantas de sorgo em 2015, sendo então reduzida pela maior atividade dessas enzimas antioxidantes. Os componentes enzimáticos como CAT, SOD, POD e não enzimáticos como os carotenoides, fazem parte de um sistema de defesa altamente eficiente para as plantas

(Bajguz e Hayat, 2009). Isto tem consequências importantes na proteção do aparato fotossintético, pois, a produção de EROs prejudica a fotossíntese pela exposição das plantas ao excesso de energia luminosa. A maior proteção do aparato fotossintético, aliado ao aumento no conteúdo de clorofilas, pode ter proporcionado maior produção de assimilados na planta e translocação para os grãos, com incrementos significativos na produtividade em 2015.

Em 2016, o solo atingiu o ponto crítico de umidade próximo ao estágio 3. Este estágio ocorre cerca de 30 dias após a emergência, fase que a planta de sorgo inicia o alongamento rápido do colmo, sendo bastante determinada pelas condições ambientais (Magalhães et al., 2012). É um período de grande demanda por água e nutrientes para satisfazer as necessidades da planta. A presença de deficiência hídrica neste estágio fenológico da cultura do sorgo, dificulta o crescimento impactando na altura das plantas, área foliar e conseqüentemente a produtividade (Ribas, 2007).

Em uma situação de estresse o conteúdo de alguns macronutrientes como o nitrogênio, pode diminuir consideravelmente nas plantas (Flores et al., 2004). O aumento do teor de nitrogênio de plantas tratadas com BL pode ser atribuído a alta absorção de N inorgânico, como nitrato do solo e assimilação. Por outro lado, a redução na aquisição de nitratos pode controlar o crescimento do sorgo e diminuir a produtividade por meio da restrição do suprimento de aminoácidos para síntese proteica ou vice-versa (El-Khallal et al., 2009).

A aplicação foliar de BL no sorgo em 2016, foi uma alternativa eficaz para aumentar a produtividade da cultura. Este aumento ocorreu em razão da maior quantidade de grãos por panícula e o incremento no peso dos grãos. O BL possivelmente contribuiu para maior disponibilidade de assimilados aos grãos em formação proporcionando aumento significativo no número e no peso destes grãos. Este resultado pode estar relacionado a maior tolerância das plantas de sorgo a deficiência hídrica proporcionado pelo BL, mediante de alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nas plantas.

A maior tolerância das plantas de sorgo com o uso do BL, é em parte compreendida pelas melhorias do balanço hídrico das plantas, como indicado pelo aumento do status hídrico (TRA) nas folhas de sorgo. Isto permite que a planta mantenha a abertura estomática, permitindo a entrada de CO₂ e o pleno funcionamento da fotossíntese (Farooq et al., 2009). As melhorias do balanço hídrico, proporciona

maior atividade fotossintética, que constitui a fonte de abastecimento dos drenos (grãos), levando ao aumento da produtividade.

A capacidade das plantas em tolerar a deficiência hídrica é determinada por múltiplos caminhos bioquímicos que facilitam a retenção ou a recuperação da água, protegem a função do cloroplasto e mantêm a acumulação ativa de solutos (Bajguz e Hayat, 2009). A acumulação de alguns solutos como os açúcares permitiu que a célula vegetal mantivesse maior teor de água do que o controle correspondente. Nota-se que o BL induz essa maior produção de açúcares nas plantas de sorgo. Estes solutos desempenham um papel importante nas plantas sob condições de estresse, em que as principais funções dos açúcares são osmoproteção e ou ajuste osmótico (Singh et al., 2012).

A tolerância ao estresse também consiste na melhoria dos sistemas de eliminação de EROs. Os danos induzidos pelo estresse foram detectados com a medição da peroxidação lipídica e estimando o teor de MDA, uma vez que a destruição da membrana e o aumento de H_2O_2 são consequências do oxigênio ativo. O BL reduziu o teor de MDA, indicando que menores danos ocorreram nas células, pois o sistema de eliminação das EROs foi mais efetivo. Os estresses ambientais aumentam a formação de EROs que oxida os pigmentos fotossintéticos, lipídios da membrana, proteínas e ácidos nucleicos (Bajguz e Hayat, 2009).

O sistema de defesa representado por enzimas como a SOD, CAT, APX, POD, juntamente com antioxidantes não enzimáticos de baixo peso molecular, tais como carotenoides, foram os responsáveis por reduzir os danos potenciais causados pelas EROs. O incremento do conteúdo de carotenoides pelas doses de BL, indica maior capacidade de fotoproteção. Aliado a isso, a inativação efetiva das EROs exigiu a ação de uma série de enzimas trabalhando em sincronia.

A maior atividade da SOD, possivelmente está relacionada ao mecanismo de defesa contra o aumento de superóxidos (O_2^-). No entanto, após a dismutação de O_2^- em H_2O_2 pela SOD, a detoxificação da célula depende ainda da ação complementar de enzimas como CAT, APX e POD, as quais degradam o H_2O_2 em água e oxigênio molecular, uma vez que esse subproduto também é tóxico (Machado et al. 2013; Chaâbani et al. 2015). Neste cenário, a maior atividade dessas enzimas observadas funcionou como parte de um sistema integrado na degradação de EROs, aumentando a tolerância as condições adversas do ambiente nas plantas de sorgo. A modulação na atividade de antioxidantes enzimáticos, proporcionado pelo BL, foi importante por

proteger o aparato fossintético e manter o status hídrico nas plantas, que por sua vez proporcionou maior crescimento e rendimento da cultura.

O Si também apresentou respostas metabólicas e fisiológicas em ambos os anos na cultura do sorgo. Em 2015, mesmo na ausência de estresse hídrico, nota-se um aumento no teor de clorofilas e maiores quantidades de proteínas nas plantas de sorgo. Em 2016, pela deficiência hídrica ocorrida, foi possível verificar que o Si garantiu maior status hídrico no tecido foliar demonstrados pelos aumentos do TRA e da massa fresca das plantas, proporcionando melhor atividade metabólica nos tecidos. Isto ocorre porque o Si acumulado junto aos estômatos reduz a taxa de transpiração, diminuindo, dessa forma, o consumo de água pela planta (Menegale et al., 2015).

Alguns trabalhos mostram que o Si pode aumentar a fotossíntese das plantas, podendo estar associado com os aumentos nas atividades das enzimas fotossintéticas, ribulose-bisfosfato carboxilase e gliceroldeído-3-fosfato desidrogenase, bem como teor de clorofila (Gong et al., 2008; Pareek et al., 2017). O maior teor de clorofila foi verificado nos dois anos de cultivo de sorgo. Além do envolvimento do silício nas atividades fisiológicas, foi observado que em condições de deficiência hídrica o silício pode aumentar a atividade de algumas enzimas antioxidantes como a APX. Essa enzima pode ajudar a aliviar do dano oxidativo das moléculas funcionais e a manutenção de muitos processos fisiológicos, como a fotossíntese (Gong et al., 2008).

Com isto, a disponibilidade de Si resultou em incrementos no crescimento e na produtividade, uma vez que o elemento pode atuar de forma indireta sobre alguns aspectos fotossintéticos e bioquímicos, e especialmente quando estas plantas estão submetidas a algum tipo de estresse, seja de natureza biótica ou abiótica. A deposição do Si aumenta o fortalecimento e a rigidez da parede celular, aumentando, portanto, a resistência das plantas ao ataque de pragas, doenças, acamamento, melhora a interceptação de luz e diminui a transpiração (Menegale et al., 2015).

Perdas de âmbito econômico na cultura do sorgo são muito comuns por conta do ataque de fungos e doenças, levando a diminuições nas produtividades e também menor valor agregado e qualidade do produto final. O fornecimento de Si em ambos os anos diminuiu a severidade de doenças economicamente importantes como a antracnose do sorgo causada pelo fungo *Colletotrichum graminicola* e danos a cultura por infestação de pragas como a *Spodoptera frugiperda*. Em 2015, a elevada precipitação aliada a temperaturas amenas (24 a 26°C), foram determinantes para a maior infecção e desenvolvimento de doenças foliares na cultura do sorgo. A menor severidade de

doenças com o fornecimento de Si pode ter ajudado a manter maior quantidade de folhas nas plantas de sorgo e com isso influenciar no número de folhas total.

Apesar de proteger a planta de fatores bióticos em 2015, o uso de Si não foi suficiente para gerar aumentos significativos na produtividade. Enquanto em 2016 a tolerância das plantas de sorgo ao ataque de pragas e doenças aliado a maior retenção de água nas plantas foi suficiente para promover aumento na produtividade, com incremento também na rentabilidade, de R\$ 114,60 por hectare.

Diante destes resultados, pode-se constatar que o aumento da produtividade do sorgo induzido pelo Si e principalmente pelo BL pode estar relacionado as mudanças do metabolismo das plantas capazes de protegê-las de estresses ambientais. O aumento a atividade das enzimas induzidas pelo BL proporcionou menor peroxidação lipídica e aumentou o teor de proteínas e o conteúdo de pigmentos fotossintéticos, refletindo diretamente no aumento da produtividade. Pode-se concluir então, que a planta de sorgo se tornou mais tolerante as condições adversas do meio ambiente, como a seca e patógenos, com o uso de BL e Si, gerando, conseqüentemente, maiores produtividades.

4.5 Conclusão

- O BL proporciona maiores produtividades de grãos de sorgo na dose de 0,200 mg L⁻¹ com elevada precipitação pluviométrica e 0,193 mg L⁻¹ em ocorrência de deficiência hídrica.
- O Si gera maior proteção das plantas a ocorrência de pragas e doenças. Em uma situação de deficiência hídrica proporciona maior acúmulo de água nos tecidos das plantas de sorgo, diminuindo os danos metabólicos nas células
- A aplicação de BL e Si, aumenta a tolerância das plantas de sorgo as condições adversas do meio ambiente, como a seca, infecções por patógenos e infestações de pragas e conseqüentemente, gera maiores produtividades.

4.6 Referências bibliográficas

ALI, Q.; ASHRAF, M. Induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) due to exogenous application of trehalose: growth, photosynthesis, water relations and oxidative defence mechanism. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 258-271, 2011.

AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; ASLAM, M.; LEE, D. J. Silicon fertilization improves the maize (*Zea mays* L.) performance under limited moisture supply. **Cereal Research Communications**, v. 44, n. 1, p. 172-185, 2016.

ANJUM, S. A.; WANG, L. C.; FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; XUE, L. L.; ZOU, C. M. J. Brassinolide Application Improves the Drought Tolerance in Maize Through Modulation of Enzymatic Antioxidants and Leaf Gas Exchange. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 197, n. 3, p. 177–185, 2011.

AZEVEDO, R. A.; ALAS, R. M.; SMITH, R. J.; LEA, P. J. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280-292, 1998.

BAJGUZ, A.; HAYAT, S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2009.

BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, H. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the qualification of microgram quantities of protein utilize the principle of protein dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 7, n.1-2, p. 248-254, 1976.

CAIRNS, J. E.; SONDER, K.; ZAIDI, P. H., VERHULST, P. N.; MAHUKU, G.; BABU, R.; NAIR, S. K.; DAS, B.; GOVAERTS, B.; VINAYAN, M. T.; RASHID, Z.; NOOR, J. J.; DEVI, P.; VICENTE, F. S.; PRASANNA, B. M. Maize production in a changing climate: impacts, adaptation, and mitigation strategies. **Advances in Agronomy**, v. 114, p. 1-65, 2012.

CAKMAK, I.; HORST, W. J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, v. 83, n. 3, p. 463-468, 1991.

CHAÂBANI, G.; TABART, J.; KEVERS, C.; DOMMES, J.; KHAN, M. I.; ZAOU, S.; KARRAY-BOURAOUI, N. Effects of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid combined to 6-Benzylaminopurine on callus induction, total phenolic and ascorbic acid production, and antioxidant activities in leaf tissue cultures of *Crataegus azarolus* L. var. aronia. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 2, p. 1-9, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 5, Safra 2017/18 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-132, 2018.

DAVIS, F. M.; N. G. S. S.; WILLIAMS, W. P. **Visual rating scales for screening whorl-stage corn for resistance to fall armyworm**. Mississippi: Agricultural and Forest Experiment Station, 1992. 9p. (Technical bulletin, 186).

DENG, Z. X.; ZHANG, W.; TANG, J. A.; OSES-PRIETO, N.; SUZUKI, J. M.; GENDRON, H.; CHEN, S.; GUAN, R. J.; CHALKEY, T. K.; PETERMAN, A. L.; BURLINGAME, Z. Y.; WANG, A. Proteomics Study of Brassinosteroid Response in *Arabidopsis*. **Mol. Cell. Proteomics**, v. 6, n. 12, p. 2058-2071, 2007.

DUARTE, J. O. Mercado e Comercialização. In: RODRIGUES, J. A. S. **Cultivo do sorgo**. 8. ed. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 26p.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EL-FEKY, S. S.; ABO-HAMAD, S. A. Effect of exogenous application of brassinolide on growth and metabolic activity of wheat seedlings under normal and salt stress conditions. **Annual Research & Review in Biology**, v. 4, n. 24, p. 3687-3698, 2014.

EL-KHALLAL, S. M.; HATHOUT, T. A.; ASHOUR, A. E. R. A.; KERRIT, A. A. Brassinolide and Salicylic Acid Induced Growth, Biochemical Activities and Productivity of Maize Plants Grown under Salt Stress. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v. 5, n. 4, p. 380-390, 2009.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília-DF, 2013, 3 ed. 353p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 400 p., 2005.

FARIDUDDIN, Q.; KHANAM, S.; HASAN, S. A.; ALI, B.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Effect of 28-homobrassinolide on the drought stress-induced changes in photosynthesis and antioxidant system of *Brassica juncea* L. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, n. 5, p. 889-897, 2009.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; BASRA, S. M. A.; DIN, I. U. Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**. v. 195, n. 4, p. 262-269, 2009.

FLORES, P.; BOTELLA, M. Á.; CERDÁ, A.; MARTÍNEZ, V. Influence of nitrate level on nitrate assimilation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants under saline stress. **Canadian journal of botany**, v. 82, n. 2, p. 207-213, 2004.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, n. 9, p.1637-1647, 2006.

GONG, H. J.; CHEN, K. M.; ZHAO, Z. G.; CHEN, G. C.; ZHOU, W. J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 3, p. 592-596, 2008.

HONNEROVÁ, J.; ROTHOVÁ, O.; HOLÁ, D.; KOCOVÁ, M.; KOHOUT, L.; KVASNICA, M. The exogenous application of brassinosteroids to *Zea mays* (L.) stressed by long-term chilling does not affect the activities of photosystem 1 or 2. **Journal of plant growth regulation**, v. 29, n. 4, p. 500-505, 2010.

KARMOLLACHAAB, A.; BAKHSHANDEH, A.; GHARINEH, M. H.; MORADITELAVAT, M. R.; FATHI, G. Effect of silicon application on physiological

characteristics and grain yield of wheat under drought stress condition. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 1, p. 30-37, 2013.

KERSEBAUM, K. C.; NENDEL, C. Site-specific impacts of climate change on wheat production across regions of Germany using different CO₂ response functions. **European Journal of Agronomy**, v. 52, p. 22-32, 2014.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; OLIVEIRA, L. A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**, Uberlândia. GPSi – ICIAG-UFU. 39p, 2004. (Boletim Técnico, 02-1ª Edição).

KRISHNA P. Brassinosteroid-mediated stress responses. **Journal of Plant Growth and Regulation**, v. 22, n. 4, p. 289-297, 2003.

MACHADO, R. F.; BARROS, A. C. S. A.; ZIMMER, P. D.; AMARAL, A. S. Reflexos do mecanismo de ação de herbicidas na qualidade fisiológica de sementes e na atividade enzimática em plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n. 3, p. 151-160, 2006.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. Ecofisiologia. In: Cultivo do Sorgo. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**. Sistemas de Produção, 2. 2012.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M. Sistema integrado de custos agropecuários - CUSTAGRI. **Informações Econômicas**, v. 28, n. 1, p. 7-28, 1998.

MARTINS, L. S.; MENEZES, C. B.; SIMON, G. A.; SILVA, A. G.; TARDIN, F. D.; GONÇALVES, F. H. Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de sorgo granífero no sudoeste de Goiás. **Agrarian**, v. 9, n. 34, p. 334-347, 2016.

MCCREADY, R. M.; GUGGOLZ, J.; SILVIERA, V.; OWENS, H. S. Determination of starch and amylose in vegetables. **Application to peas Analytical Chemistry**, v. 22, n. 9, p. 1156-1158, 1950.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 4, n. especial, p. 435-454, 2015.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical chemistry**, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

MKONDA, M. Y.; HE, X. Yields of the Major Food Crops: Implications to Food Security and Policy in Tanzania's Semi-Arid Agro-Ecological Zone. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1490, 2017.

PAREEK, S.; SAGAR, N. A.; SHARMA, S.; KUMAR, V.; AGARWAL, T.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A.; YAHIA, E. M. Chlorophylls: Chemistry and Biological Functions. **Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health**, v. 1, n. 2, p. 269-284, 2017.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABBOUD, A. C. S.; MACAULEY, H. R. Tolerância protoplasmática foliar à seca, em dois genótipos de caupi cultivados em campo. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, n. 22, n. 1, p. 07-14, 2002.

POSSAMAI, J. M.; SOUZA, C. M.; GALVÃO, J. C. C. Sistemas de preparo do solo para o cultivo do milho safrinha. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 79-82, 2001.

RADFORD, P. J. Growth analysis formulae: their use and abuse. In: NAKAZONO, E. M.; COSTA, M. C.; FUTATSUGI, K.; PAULILO, M. T. S. Análise comparativa de crescimento entre genótipos de pimenta cultivados em casa de vegetação. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, p. 125-131, 2013.

RIBAS, P. M. Cultivo do sorgo. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo** (Versão eletrônica), 3^a ed., set, 2007.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H.; JIAWEN, W.; SUN, H.; GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 78, p. 27-36, 2014.

SINGH, I.; KUMAR, U.; SINGH, S. K.; GUPTA, C.; SINGH, M.; KUSHWAHA, S. R. Physiological and biochemical effect of 24-epibrassinolide on cold tolerance in maize seedlings. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 18, n. 3, p. 229-236, 2012.

SUDHAKAR, C.; LAKSHMI, A.; GIRIDARAKUMAR, S. Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. **Plant Science**, v. 161, n. 3, p. 613-619, 2001.

TRIPATHI, A., TRIPATHI, D. K., CHAUHAN, D. K., KUMAR, N., SINGH, G. S. Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: a review on current knowledge and future prospects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 356-373, 2016.

VARDHINI, B. V.; SUJATHA, E.; RAO, S. S. R. Brassinosteroids: alleviation of water stress in certain enzymes of sorghum seedlings. **Journal of Phytology**, v. 3, n. 10, p. 38-43, 2011.

VASQUEZ-TELLO, A.; ZUILY-FODIL, Y.; PHAM THI, A. T.; VIEIRA DA SILVA, J. B. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. **Journal of Experimental Botany**, n. 41, n. 7, p. 827-32, 1990.

WANG, M.; LI, Y.; YE, W.; BORNMAN, J.F.; YAN, X. Effects of climate change on maize production and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China. **Climate Research**, v. 46, n. 3, p. 223-242, 2011.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

ZHANG, M.; ZHAI, Z.; TIAN, X.; DUAN, L.; LI, Z. Brassinolide alleviated the adverse effect of water deficits on photosynthesis and the antioxidant of soybean (*Glycine max* L.). **Plant growth regulation**, v. 56, n. 3, p. 257-264, 2008.

5. CONCLUSÃO GERAL

A aplicação de brassinolídeo atenuou parcialmente os efeitos prejudiciais da deficiência hídrica nas plantas de milho e sorgo.

As plantas foram capazes de responder as condições adversas do meio ambiente, geralmente promovida pela seca, infecções por patógenos e infestações de pragas, através de alterações nos processos fisiológicos e bioquímicos, melhorando o sistema de defesa das plantas catalisados pelos antioxidantes enzimáticos, garantindo assim melhor função celular.

As doses que proporcionaram maiores produtividades na cultura do milho foram de 0,149 mg L⁻¹ com elevada precipitação pluviométrica e 0,134 mg L⁻¹ em ocorrência de deficiência hídrica. Para a cultura do sorgo, foram de 0,200 mg L⁻¹ com elevada precipitação pluviométrica e 0,193 mg L⁻¹ em ocorrência de deficiência hídrica.

O Si proporcionou menores danos de pragas e severidade de doenças em ambas as culturas. Em uma situação de deficiência hídrica o Si proporciona maior acúmulo de água nos tecidos das plantas de milho e sorgo, diminuindo os danos metabólicos nas células e aumentando a produtividade das culturas.