

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MATHEUS PEREIRA DE BRITO MATEUS

**HORMESE POR 2,4-D EM ALGODOEIRO NA INTERAÇÃO COM REGULADOR
DE CRESCIMENTO**



Ilha Solteira - SP
2024

MATHEUS PEREIRA DE BRITO MATEUS

**HORMESE POR 2,4-D EM ALGODOEIRO NA INTERAÇÃO COM REGULADOR
DE CRESCIMENTO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de Concentração: Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Enes Furlani Júnior

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Mateus, Matheus Pereira de Brito.

M425h Hormese por 2,4-D em algodoeiro na interação com regulador de crescimento / Matheus Pereira de Brito Mateus. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
69 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Enes Furlani Junior

Inclui bibliografia

1. Promoção de crescimento. 2. Herbicida. 3. Antagonismo. 4. Ecofisiologia.



Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8.4061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto deste estudo na sociedade terá como potencial científico promover abertura de novas possibilidades de estudo sobre a hormese em algodão, permitindo novas interações entre os tratamentos e tecnologias de campo. No meio técnico e social, permitirá aos agricultores novos manejos do algodoeiro para aumentarem sua produtividade e obterem maior lucro. Sobre a internacionalização, possibilita com que novas moléculas de herbicidas possam ser integradas no estudo a fim de comprovarem possíveis efeitos de hormese. Além disso, permitindo com que haja inserção de novos estudos sobre promoção de crescimento em plantas e interação com produtos biológicos a fim de produzir mais alimentos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The impact of this study on society will have the scientific potential of promoting the opening of new possibilities for studying hormesis in cotton, allowing new interactions between treatments and field technologies. In technical and social terms, it will allow farmers to use cotton crops in new ways to increase their productivity and obtain greater profits. Regarding internationalization, it allows new herbicide molecules to be integrated into the study in order to prove possible hormesis effects. Furthermore, allowing the insertion of new studies on plant growth promotion and interaction with biological products in order to produce more food.

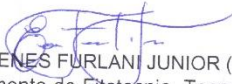
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA TESE: HORMESE POR 2,4-D EM ALGODOEIRO NA INTERAÇÃO COM REGULADOR DE CRESCIMENTO


AUTOR: MATHEUS PEREIRA DE BRITO MATEUS

ORIENTADOR: ENES FURLANI JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ENES FURLANI JUNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Socio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. SAMUEL FERRARI (Participação Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP


Profa. Dra. DAYANE BORTOLOTO DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio-Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. DANILO MARCELO AIRES DOS SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Estadual do Tocantins - UNITINS


Prof. Dr. JEFFERSON ANTHONY GABRIEL DE OLIVEIRA (Participação Presencial)
Departamento de Agronomia / Faculdades Integradas de Três Lagoas - AEMS

Ilha Solteira, 29 de maio de 2024



Dedico este trabalho a todos os agricultores, pesquisadores e demais trabalhadores do campo que, mesmo com muitas adversidades, confiam na prosperidade de produção de alimentos para o mundo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Javé, Jesus e Maria.

Aos meus amadíssimos pais Carlos Alberto Pereira Mateus e Maria Imaculada de Brito Mateus, aos meus irmãos Felipe de Brito Mateus e Débora de Brito Mateus por toda a motivação no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Doutores que constituíram a banca examinadora e pelo apoio intelectual e científico na redação deste estudo.

Aos Professores Marco Eustáquio de Sá, Grace de Queiroz David, Walmor Moya Peres, Enes Furlani Júnior, Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho e a todos os demais docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP/FEIS) pela amizade e ensinamentos que contribuíram para minha qualificação profissional.

Aos técnicos da FEPE: Cesar, Elton, Wesley, Alvino, entre outros, que estiveram presentes nas avaliações de campo e realização de manejo da cultura. E a todos os demais familiares, amigos e colegas que contribuíram de maneira direta ou indiretamente para condução da pesquisa, análises laboratoriais e de campo ou redação, sendo integrantes fundamentais para realização de tal estudo.

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

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem a sua própria razão para existir”.

- Albert Einstein

RESUMO

A hormese vegetal está se tornando cada vez mais elucidada em seus efeitos no metabolismo das plantas. Entretanto, o efeito hormético varia de acordo com o produto utilizado e a espécie vegetal, apresentando níveis de promoção e toxicidade distintos. O uso de reguladores de crescimento em algodão é uma prática consolidada na agricultura mecanizada, melhorando a arquitetura das plantas pela inibição da biossíntese de giberelinas, diferindo da resposta hormética pelo herbicida 2,4-D que possui constituição sintética de auxinas, fitormônio responsável pelo crescimento da planta. Além dos reguladores de crescimento, estresses ambientais, como a seca, também alteram o padrão de crescimento do algodoeiro, resultando em plantas menores e menos produtivas. O objetivo do primeiro estudo foi avaliar a tríplice interação entre subdoses de 2,4-D e regulador de crescimento no algodoeiro sob diferentes disponibilidades hídricas nos parâmetros morfofisiológicos e no segundo estudo avaliar essa interação sobre a biometria e produtividade do algodoeiro. O primeiro experimento foi instalado em casa de vegetação utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado constituído por fatorial triplo 2x4x2 com três repetições e o segundo experimento foi instalado em campo em esquema fatorial 2x4 com 4 repetições. Foram avaliados parâmetros fisiológicos como trocas gasosas e índice SPAD, morfológicos como altura de plantas, diâmetro do caule e bioquímicos por meio de compostos açucarados e nitrogenados. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de significância, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância e aplicada regressão polinomial às doses e posteriormente selecionado o modelo que melhor se ajusta aos dados. As maiores subdoses de 2,4-D aplicadas via foliar resultaram em menor índice SPAD, com plantas mais amareladas, reduzindo também a fotossíntese, transpiração e condutância estomática, enquanto que, em baixa concentração, proporcionou maior desenvolvimento da parte aérea em plantas tratadas com regulador de crescimento, além de aumentar a concentração de açúcares solúveis, compostos nitrogenados nas folhas, o número de ramos reprodutivos e incrementos significativos na produtividade de algodão em caroço.

Palavras-chave: promoção de crescimento; herbicida; antagonismo; ecofisiologia.

ABSTRACT

Plant hormesis is becoming increasingly elucidated in its effects on plant metabolism. However, the hormetic effect varies according to the product used and the plant species, presenting different levels of promotion and toxicity. The use of growth regulators in cotton is a consolidated practice in mechanized agriculture, improving plant architecture by inhibiting the biosynthesis of gibberellins, differing from the hormetic response by the 2,4-D herbicide which has a synthetic constitution of auxins, the phytohormone responsible for growth of the plant. In addition to growth regulators, environmental stresses, such as drought, also alter the cotton growth pattern, resulting in smaller and less productive plants. The objective of the first study was to evaluate the triple interaction between subdoses of 2,4-D and growth regulator in cotton under different water availability on morphophysiological parameters and in the second study to evaluate this interaction on cotton biometrics and yield. The first experiment was installed in a greenhouse using a completely randomized experimental design consisting of a 2x4x2 triple factorial with three replications and the second experiment was installed in the field in a 2x4 factorial scheme with 4 replications. Physiological parameters such as gas exchange and SPAD index, morphological parameters such as plant height, stem diameter and biochemical parameters using sugar and nitrogen compounds were evaluated. The data were subjected to analysis of variance using the F test at a 5% level of significance, when significant, the means were compared using the Tukey test at a 5% level of significance and polynomial regression was applied to the doses and subsequently the model that best fits the data. The highest subdoses of 2,4-D applied via foliar resulted in a lower SPAD index, with more yellowish plants, also reducing photosynthesis, transpiration and stomatal conductance, while, at low concentration, it provided greater development of the aerial part in plants treated with growth regulator, in addition to increasing the concentration of soluble sugars, nitrogenous compounds in the leaves, the number of reproductive branches and significant increases in seed cotton yield.

Keywords: growth promotion; herbicide; antagonism; ecophysiology.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – (a) algodoeiro desfolhado com filotaxia em espiral. (b) diagrama geral de emergência das flores nos ramos frutíferos, por posição de frutificação.20
- Figura 2** – Mudanças de algodão controle e tratadas com cloreto de mepiquat aos 10 dias após o tratamento. (A) setas brancas indicam o segundo entrenó, barra = 10 cm; (B) o segundo entrenó de plantas, barra = 3 cm.21
- Figura 3** – Estágios de iniciação e alongamento da fibra de algodão.....22
- Figura 4** – Curva dose-resposta hormética23
- Figura 5** – Estrutura química de auxinas sintéticas25
- Figura 6** – Plântulas de algodão recém emergidas em uma das repetições, antes de serem desbastadas.29
- Figura 7** – Valores médios mensais de Precipitação, Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), Temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) e Temperatura mínima ($T_{\text{mín}}$) durante o período de janeiro à setembro de 2023.....30
- Figura 8** – Extração de compostos em MCW para análise de perfil de metabólitos, com ênfase na etapa de separação de fases lipossolúvel e hidrossolúvel.34

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Análise de variância (quadrados médios) para os parâmetros: índice SPAD (SPAD), fotossíntese (A), concentração intercelular de CO₂ (C_i), condutância estomática (g_s) e transpiração (E).36
- Tabela 2 – Análise de variância (quadrados médios) para os parâmetros: altura de plantas (ALT), açúcares solúveis totais (AST), nitrato (NO₃⁻) e amônia (NH₃).....43
- Tabela 3 – Análise de variância (Quadrados médios) das características agronômicas do algodoeiro: Altura de plantas (ALT), Diâmetro de caule (DMT), número de ramos (N_RAMO), número de capulhos (N_CAP) e produtividade (PROD).....51

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D no índice SPAD. 37
- Gráfico 2 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na fotossíntese..... 38
- Gráfico 3 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na transpiração..... 40
- Gráfico 4 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica e herbicida, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na condutância estomática..... 41
- Gráfico 5 – Doses de herbicida 2,4-D na concentração intercelular de CO₂. .. 43
- Gráfico 6 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na Altura de plantas..... 44
- Gráfico 7 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de açúcares solúveis totais..... 46
- Gráfico 8 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de nitrato foliar. 48
- Gráfico 9 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de amônia foliar. 49
- Gráfico 10 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a variável altura de plantas..... 52

- Gráfico 11 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a variável diâmetro do caule..... 53
- Gráfico 12 – Análise de regressão para as subdoses de 2,4-D sobre o número de ramos reprodutivos do algodoeiro. 55
- Gráfico 13 – Análise das médias do tratamento Regulador de crescimento para o número médio de capulhos por planta de algodão..... 56
- Gráfico 14 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a produtividade de algodão em caroço..... 57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

R.C.	Regulador de crescimento
D.H.	Deficiência hídrica
FV	Fonte de Variação
GL	Graus de Liberdade
QM	Quadrado médio
CV	Coefficiente de variação
DMS	Diferença Mínima Significativa
EP	Erro Padrão da média
kg	Quilograma
cm	Centímetros
ha	Hectare

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Botânica e cultivo do algodão	19
2.2	Hormese	23
2.3	Herbicida 2,4-D.....	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	Caracterização do experimento 1	28
3.2	Caracterização do experimento 2	30
3.3	Índice SPAD e Parâmetros de trocas gasosas	32
3.4	Análise biométrica de plantas	33
3.5	Extração de compostos nitrogenados e açucarados	33
3.6	Análise estatística	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Experimento 1.....	36
4.2	Experimento 2.....	50
5	CONCLUSÃO	59
5.1	Conclusão experimento 1	59
5.2	Conclusão experimento 2	59
	REFERÊNCIAS	60
	Apêndice A – Experimento 1: plantas de algodão em boa disponibilidade hídrica....	66
	Apêndice B – Experimento 1: plantas de algodão SOB DEFICIÊNCIA hídrica.....	67
	Apêndice C – Experimento 2: Semeadura direta do algodão SAFRA 2022/23.....	68
	Apêndice D – Experimento 2: Análise biométrica de plantas, coleta de plumas para qualidade de fibra e da produtividade de algodão em caroço.	69

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as pesquisas em hormese vegetal vêm aumentando rapidamente devido aos efeitos estimulatórios no desenvolvimento da planta em busca de altas produtividades, entretanto, o efeito resposta positivo da baixa concentração varia de acordo com a espécie botânica e do elemento aplicado (Erofeeva, 2022). A hormese é caracterizada por uma resposta bifásica de estímulo em baixa concentração, geralmente expressando respostas quantitativas de crescimento 30 a 60% superiores em relação ao controle, podendo ser inibida por altas concentrações (Calabrese; Agathokleous, 2021). Em *Carthamus tinctorius* as subdoses de *Glyphosate* aplicadas (<37 g i.a. ha⁻¹) promoveram efeitos benéficos na atividade antioxidante das plantas estressadas pela deficiência hídrica por meio modulações fisiológicas e bioquímicas (Santos *et al.*, 2022).

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) por ser uma espécie de hábito indeterminado, pode apresentar crescimento excessivo do caule, alterando a relação fonte/dreno, sendo assim, o uso de reguladores de crescimento que inibem a biossíntese de giberelina (cloreto de mepiquat) nessa cultura além de controlar adequadamente a arquitetura da planta pela redução de sua estatura, pode facilitar operações de tratamento fitossanitário, colheita mecanizada e propiciar melhor interceptação de radiação solar (Rossi *et al.*, 2020). A aplicação desses reguladores pode ser de várias formas, via semente ou via foliar (Fang *et al.*, 2019), em aplicação única ou parcelada, entretanto, melhores efeitos na redução da altura de plantas foram obtidos pela aplicação via foliar com dose total parcelada em até quatro vezes (Furlani Júnior *et al.*, 2003).

Por serem inibidores da biossíntese de giberelinas, diminuindo a altura de plantas pelo encurtamento dos entrenós, os reguladores de crescimento podem exercer efeitos antagonistas àqueles proporcionados pela aplicação em subdoses de herbicidas, como o 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético), que segundo Islam *et al.* (2017) esse herbicida em baixa concentração promove o crescimento das plantas através da produção de auxinas, defesa antioxidante, alteração anatômica e nos transportadores de cátions na rizosfera, caracterizando uma das hipóteses neste estudo, correlacionar a altura do algodoeiro pela hormese por herbicida 2,4-D em plantas tratadas com cloreto de mepiquat.

Além disso, estresses abióticos são muito comuns em lavouras de algodão. A nível celular, o estresse hídrico estimula a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), Ca^{+2} e sinalização mediada por ácido abscísico, afetando também numerosos outros processos fisiológicos como fotossíntese, redução do crescimento de parte aérea e raízes, transpiração, osmoregulação e expansão foliar (Meshram *et al.*, 2022). Algumas estratégias agronômicas são utilizadas para tentar mitigar esses efeitos adversos, tais como, aplicação exógena de ácido acético, ABA, ácido salicílico, prolina e poliaminas, promovendo maior tolerância do algodão à escassez de água (Ul-Allah *et al.*, 2021).

O objetivo do primeiro estudo (realizado em casa de vegetação) foi caracterizar morfofisiologicamente o efeito hormese pela aplicação em subdoses de herbicida 2,4-D no algodoeiro e sua interação com regulador de crescimento em diferentes disponibilidades hídricas. No segundo estudo (em campo), objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de subdoses e regulador de crescimento sobre os parâmetros biométricos e produtivos do algodoeiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Botânica e cultivo do algodão

O conhecimento sobre o algodão no Brasil remonta ao período anterior ao descobrimento do país e era efetivamente utilizado pelos índios para fazer redes, curar feridas e até mesmo na alimentação (Associação Mato-Grossense dos Produtores de Algodão – AMPA, 2024). Dentre as espécies de algodão do gênero *Gossypium* (Malvaceae) existentes, destacam-se no cultivo brasileiro a *G. hirsutum*, principal utilizada na produção agrícola tecnificada, e *G. barbadense*, bastante utilizada pelos índios, e são responsáveis por quase toda produção mundial de fibras comerciais (Menezes, 2009).

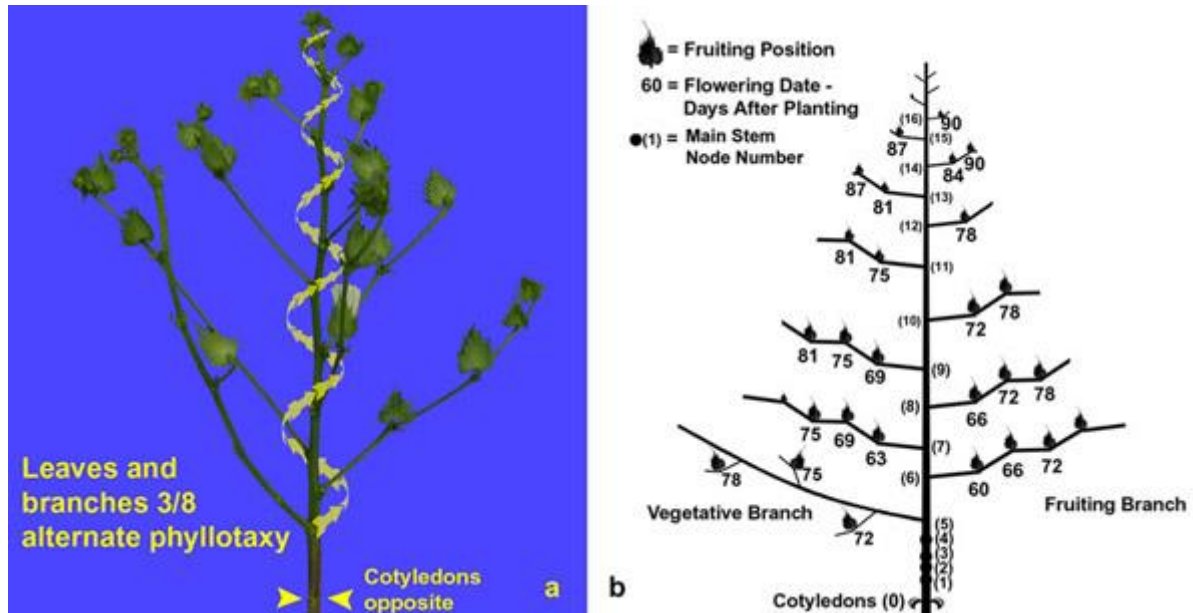
A produção de algodão no Brasil, de acordo com o Serviço de Agricultura Estrangeiro do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – FAS/USDA (2024) para a safra 2022/23 foi de 2,55 milhões de toneladas, colocando o País em quarto lugar no ranking mundial de cotonicultores, ficando atrás da China (6,68), Índia (5,72) e Estados Unidos (3,15), entretanto, a projeção para esse ano é que o Brasil alcance a terceira posição do ranking com produção de 3,17 milhões de toneladas, área plantada de 1,66 milhões de hectares e produtividade de 1.910,0 kg ha⁻¹.

A espécie *G. hirsutum* var. *latifolium* Hutch é uma das plantas mais cultivadas no mundo devido à ampla utilização e ser a fonte de fibra natural mais importante para a indústria têxtil, sendo um produto de extrema importância socioeconômica para o Brasil (Martins *et al.*, 2023). Essa espécie possui característica de porte baixo, fibras curtas a médias e ciclo reprodutivo relativamente curto compreendendo entre 140 a 150 dias, adaptando-se muito bem ao sistema de cultivo nos cerrados e sistema de processamento das fibras nas indústrias têxteis.

O início da floração se dá a partir de ramos reprodutivos que surgem através de gemas extra axilares, na parte inferior da planta, no quinto nó da haste principal, esses ramos podem ser bastante vigorosos. O aparecimento da flor ocorre em espiral (Figura 1a) e o surgimento de novos botões florais ocorre em intervalos de três dias entre os primeiros frutos de dois ramos sequenciais e a cada seis dias entre dois frutos sequenciais no mesmo ramo reprodutivo (Figura 1b), de acordo com Soares; Busoli

(1996). As flores recém-abertas possuem inicialmente coloração amarelo-creme e após serem fecundadas tornam-se rosadas.

Figura 1 – (a) algodoeiro desfolhado com filotaxia em espiral. (b) diagrama geral de emergência das flores nos ramos frutíferos, por posição de frutificação.



Fonte: Extraído de Richie *et al.* 2004.

Com o início do período reprodutivo o crescimento do caule em altura torna-se mais vigoroso em função dos graus-dia acumulados e com isso, pode-se fazer uso de modelos de crescimento para determinar sua taxa de crescimento médio (Bender *et al.*, 2020). É muito importante avaliar o crescimento da cultura em campo para as práticas de manejo com uso de reguladores de crescimento, controlar o crescimento da planta de algodão faz com que a energia produzida para o crescimento vegetativo excessivo seja desviada para o desenvolvimento dos frutos, aumentando a retenção das maçãs e acelera a maturidade dos frutos em cultivares responsivas (Chalise *et al.*, 2022).

Plantas de algodão maiores normalmente têm mais pontos de frutificação para a formação de capulhos, no entanto, a menor penetração da luz nos ramos inferiores da copa reduz a retenção das maçãs (Chalise *et al.*, 2022). O controle do crescimento pode ser feito através da aplicação de produtos fitossanitários que atuam no bloqueio da síntese de giberelinas GA_1 , hormônio responsável pelo crescimento do caule em altura quando associado à presença de auxinas, como o cloreto de mepiquat e cloreto

de cloromequat (Figura 2a; Figura 2b), que reduzem a altura das plantas e equilibram a produção e qualidade da fibra. O momento de iniciar a primeira aplicação geralmente ocorre quando as plantas emitem os primeiros botões florais e medem aproximadamente 30 a 45 cm de altura, sendo necessário monitorar o clima, evitando pulverizações durante períodos de estresse hídrico ou em horários mais quentes do dia, e que haja ausência de chuva por no mínimo quatro horas após aplicação do produto (Lamas; Barcellos; Bogiani, 2013).

Figura 2 – Mudanças de algodão controle e tratadas com cloreto de mepiquat aos 10 dias após o tratamento. (A) setas brancas indicam o segundo entrenó, barra = 10 cm; (B) o segundo entrenó de plantas, barra = 3 cm.



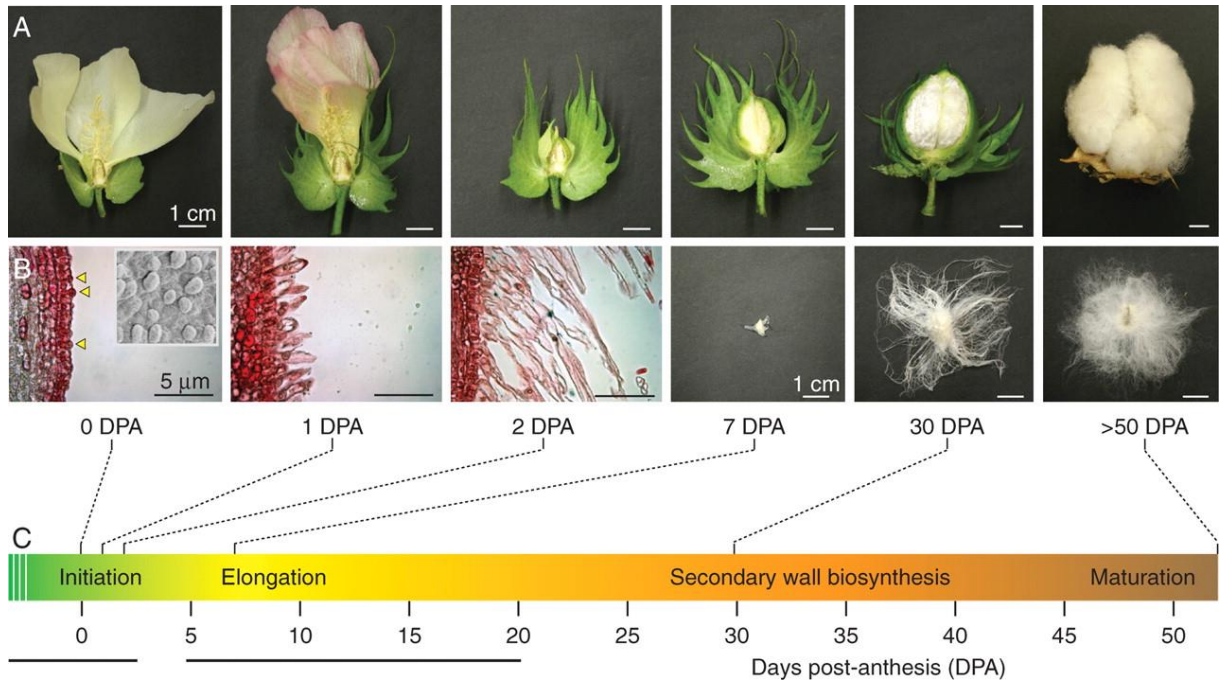
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021).

Doses muito altas de reguladores de crescimento podem resultar em plantas muito baixas e conseqüentemente, queda acentuada na produção. No entanto, doses baixas geralmente não têm o efeito pretendido. Para evitar esse desafio, deve-se usar a dosagem da bula do regulador de crescimento e dividi-la adequadamente em quatro ou mais aplicações, desse modo, a dose fracionada deve ser aplicada em função das atualizações diárias do crescimento da planta, quando a taxa de crescimento médio diário é superior à 1,5 cm (Lamas; Ferreira, 2006).

Sabe-se também que a disponibilidade excessiva de água retarda a maturação, aumentando assim a duração da estação de crescimento, prejudicando o desenvolvimento da fibra (Ermanis *et al.*, 2021). As fibras de algodão são projeções unicelulares originadas de células da superfície do óvulo e durante sua formação passam por cinco fases sucessivas de crescimento: iniciação isodiamétrica da fibra,

aumento de tamanho celular, espessamento da parede de transição, formação da parede celular secundária e amadurecimento (Kim; Triplett, 2001; Haigler *et al.*, 2012). O aumento de tamanho celular é uma etapa crucial no desenvolvimento das fibras e influencia diretamente no comprimento e na qualidade final das fibras (Figura 3).

Figura 3 – Estágios de iniciação e alongamento da fibra de algodão.



Fonte: Extraído de Lee *et al.* (2007).

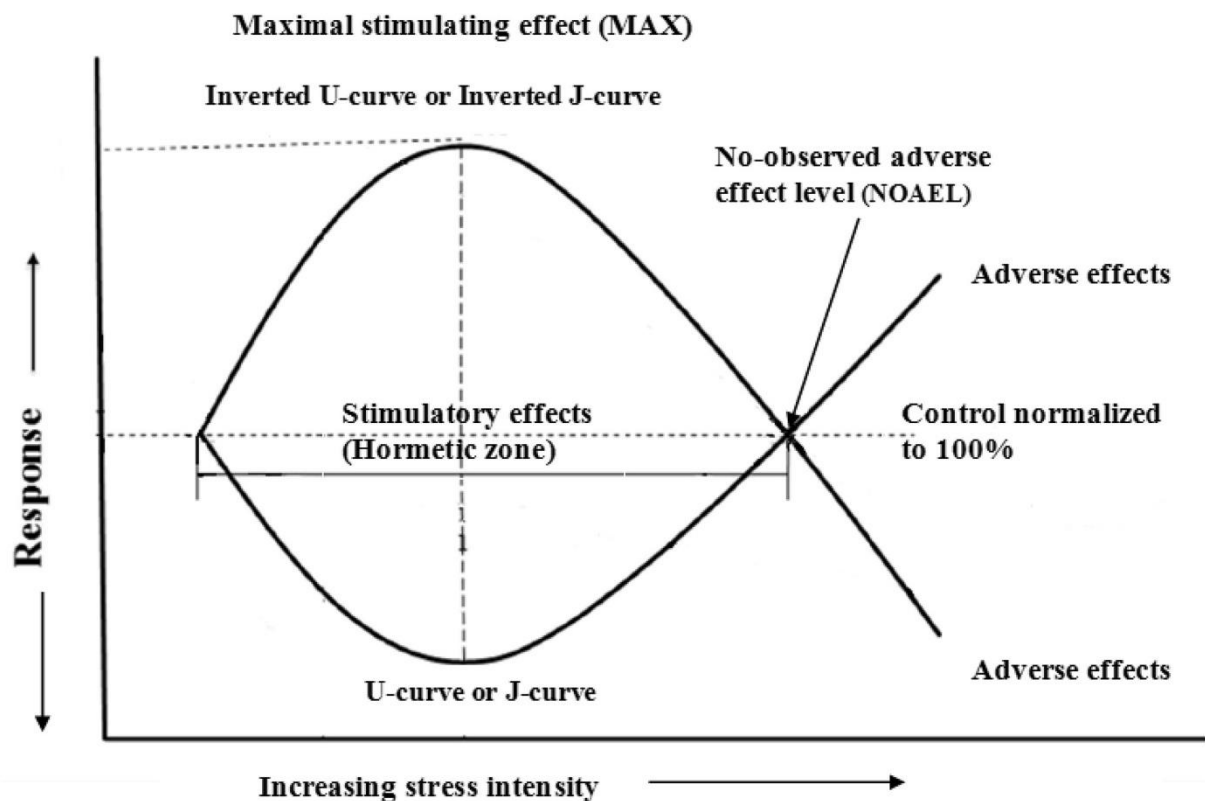
Nota: (A) desenvolvimento das flores, cápsulas e fibras de algodão, (B) desenvolvimento da fibra ao longo dos dias após antese (DPA), (C) estágios parcialmente sobrepostos do desenvolvimento da fibra de algodão.

Quando maduras, as fibras do algodão podem apresentar diferenças em sua qualidade em função da temperatura durante sua formação, disponibilidade hídrica no cultivo, crescimento, desenvolvimento e nutrição da planta matriz (Beegum *et al.*, 2023). Dentre as características de qualidade importantes para a avaliação da pluma destacam-se o comprimento, resistência, Micronaire, uniformidade, maturidade e alvura (Velmurugan *et al.*, 2023).

2.2 Hormese

Hormese é o fenômeno em que um agente estressante, conhecido por ser tóxico em altas concentrações, induz respostas de estímulo em concentrações mais baixas. Essa resposta geralmente tem efeito bifásico em função da relação dose-resposta, alternando de estímulo para inibição (Agathokelous *et al.*, 2024). Essa relação dose-resposta também pode indicar que efeitos biologicamente significativos podem ocorrer em doses indutoras de estresse muitas vezes inferiores àquelas onde os limites de toxicidade tradicionais aparecem (Figura 4), sendo conhecidos por NOAEL – nível de efeito adverso não observado (Calabrese; Blain, 2009).

Figura 4 – Curva dose-resposta hormética



Fonte: Extraído de Erofeeva (2022).

Nota: A zona hormética é a faixa de dose que causa um efeito estimulante em comparação com o nível controle. São apresentados dois tipos de curvas: 1) a curva U ou J invertida mais frequentemente observada representa o estímulo em baixas doses e inibição em altas doses; 2) a curva U ou J representa uma diminuição dos danos em doses baixas e aumento dos danos em doses altas.

Vários compostos podem ser utilizados para estimular esse efeito hormético. Em soja (*Glycine max* (L.) Merrill), a aplicação de subdoses de *Glyphosate* via

semente proporcionou estímulo de crescimento e acúmulo de biomassa das plântulas, porém a concentração variou entre cultivares convencionais e cultivares com tecnologia de resistência ao glifosato (Krenchinski *et al.*, 2024). Em outro estudo realizado com a espécie *Carthamus tinctorius* as doses menores de *Glyphosate* (<37 g i.a. ha⁻¹) demonstraram melhorias significativas na atividade antioxidante das plantas sujeitas ao estresse causado pela deficiência hídrica por meio alterações fisiológicas e bioquímicas (Santos *et al.*, 2022).

Para o algodão, a aplicação de subdoses de 2,4-D, nas cultivares FMT 701 e Fibermax 966, causou alterações benéficas no crescimento reprodutivo, gerando maior quantidade de estruturas reprodutivas e maior produtividade de algodão em caroço (Americo; Americo-Pinheiro; Furlani Junior, 2017). Já para a cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) as subdoses de *Glyphosate* proporcionaram maiores concentrações foliares de fósforo (P), melhorando o crescimento das plantas, produtividade e qualidade tecnológica dos colmos, aumentando o Brix do caldo e o açúcar total recuperável em relação ao controle sem aplicação (Pincelli-Souza *et al.*, 2020).

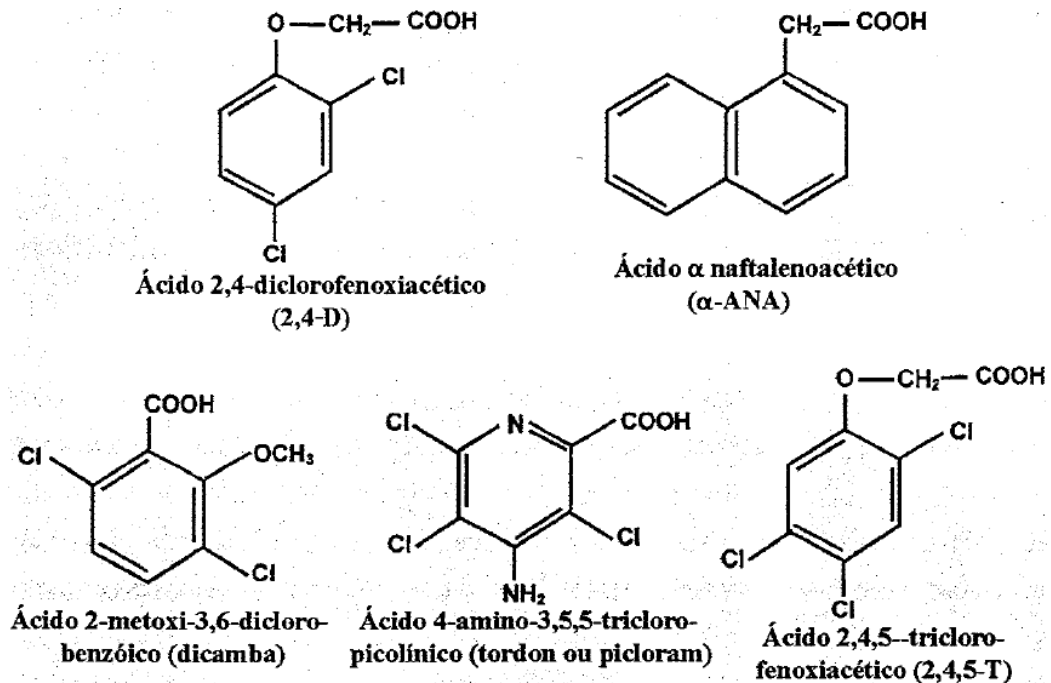
Efeitos de hormese também foram observados com o uso de metais em plantas bioacumuladoras, onde o Cádmio (Cd), uma das substâncias mais tóxicas para as plantas entre os metais pesados, em alta concentração ativou o efeito excitatório em 7 dos 18 biomarcadores testados em *Tillandsia ionantha*, resultado de múltiplos mecanismos (Zhang *et al.*, 2023). Assim como o óxido nítrico na biologia vegetal por meio da preparação hormonal (Calabrese; Agathokleous, 2023), o iodeto de prata, hidrocarbonetos, produtos farmacêuticos e pesticidas na saúde dos ecossistemas agroflorestais (Agathokleous *et al.*, 2022).

Além das plantas com flores, os efeitos estimulatórios também foram observados na saúde humana (Chen *et al.*, 2019; Calabrese *et al.*, 2024; Hill *et al.*, 2024), na fisiologia e metabolismo de insetos (Shen; Liang; Jin, 2023; Campbell; López-Martínez, 2022), na resposta enzimática de defesa antioxidante em algas (Mo *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024) e no crescimento, comportamento e reprodução em animais (Rix; Guedes; Cutler, 2022)

2.3 Herbicida 2,4-D

O herbicida *2,4-dichlorophenoxy acetic acid*, também conhecido por 2,4-D, é caracterizado por ser um mimetizador sintético da auxina em alta concentração, de caráter sistêmico e seletivo (Figura 5). O 2,4-D imita a auxina natural em nível molecular e os avanços na identificação de componentes de sinalização da auxina auxiliaram a elucidar os mecanismos moleculares envolvidos no funcionamento dessa molécula como herbicida.

Figura 5 – Estrutura química de auxinas sintéticas



Fonte: Extraído de Kerbaudy (2004).

Seu efeito no metabolismo vegetal inclui alteração anormal no crescimento dos tecidos, divisão celular desordenada e senescência, causando a morte das plantas (Song, 2014; Juan *et al.*, 2021). O principal mecanismo de ação desse herbicida nas plantas é o estímulo na produção da enzima ácido-1-carboxílico-1-aminociclo-propano (ACC) sintase, que atua na biossíntese do hormônio etileno nas folhas (Queiroz; Vidal, 2014), que induz a epinastia das folhas e estimula a formação de ácido abscísico (ABA) que regula o fechamento dos estômatos, restringe a transpiração e a absorção de carbono, resultando em maior produção de radicais livres, também conhecidas por

espécies reativas de oxigênio (EROs), que são tóxicas às células (Magnoli *et al.*, 2020).

Esse herbicida é comercializado desde 1946 e foi o primeiro herbicida orgânico e seletivo eficaz, permitindo um controle mais aprimorado de ervas daninhas em trigo, milho, arroz e outras gramíneas semelhantes, porque visa especificamente ervas daninhas de folha larga, como as dicotiledôneas, e devido ao seu baixo custo e uso contínuo, hoje é um dos herbicidas mais utilizados no mundo (Song, 2014). De acordo com o último levantamento realizado pelo Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), foram comercializados, no Brasil, 800.652,0 toneladas de ingredientes ativos classificados como “Químicos e Bioquímicos”, sendo os cinco mais comercializados: Glifosato e seus sais; 2,4-D; Atrazina; Mancozebe e Acefato (BRASIL, 2022). O herbicida 2,4-D é fabricado na forma de éster butílico, sal de dimetilamina, ácido e sal de colina, podendo ser aplicado em pré e pós-emergência das plantas daninhas conforme recomendação da bula. Entre as auxinas sintéticas existem quatro grupos químicos: fenoxialcanoatos (2,4-D, 2,4-DB, MCPA e MCPB), benzoatos (dicamba), piridinacarboxilatos (clopyralid, fluroxipyr, picloran e triclopyr) e quinolinocarboxilatos (quinclorac e quinmerac) (Di Meo, 2012).

O mecanismo de ação desses compostos está relacionado ao metabolismo dos ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Acredita-se que o 2,4-D possa atuar na fisiologia da planta semelhante à auxina natural, causando acidificação da parede celular e conseqüentemente seu afrouxamento pelo estímulo da bomba de prótons, induzindo o alongamento celular. De acordo com Oliveira Junior (2011), as baixas concentrações desse herbicida estimulam a RNA polimerase e aumenta a biossíntese de RNA, DNA e proteínas, causando aumentos anormais de auxina e giberelina, promovendo a divisão e alongamento celular acelerado e desordenado nas regiões meristemáticas da planta. Ainda de acordo com o autor, esse herbicida em alta concentração inibe a divisão celular e o crescimento das regiões jovens, acumulando fotoassimilados e moléculas de 2,4-D transportadas pelo floema. Após a pulverização desses produtos em plantas sensíveis, verificou-se rapidamente um aumento significativo na enzima celulase, sobretudo nas raízes. Esses efeitos resultam em epinastia foliar, torção do caule, espessamento das gemas terminais, danos ao sistema radicular e morte da planta em questão de poucos dias ou semanas. A aplicação desses herbicidas em plantas sensíveis desencadeia desequilíbrios no

metabolismo dos ácidos nucleicos, aumento na atividade enzimática e lesões no floema, o que provoca o alongamento e a ruptura das células (MACHADO *et al.*, 2006).

Entretanto, por ser um tipo de herbicida com modo de ação semelhante aos reguladores vegetais, subdoses de 2,4-D têm a capacidade de estimular o crescimento em vez de causar a morte dos vegetais, e esse fenômeno é conhecido como efeito hormético ou hormese (Aguilar, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do experimento 1

O primeiro experimento foi realizado em casa de vegetação no dia 10 de março ao dia 8 de junho de 2022, no campus da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira pertencente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil (latitude 20° 22' S, longitude 51° 22' W e altitude de 330 m). O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo de textura arenosa (Santos *et al.*, 2018), possuindo características granulométricas de 139 g·kg⁻¹ de argila, 857 g·kg⁻¹ de areia e 4 g·kg⁻¹ de silte na camada de 0-0,20 m de profundidade.

Antes da instalação das parcelas experimentais, a camada de 0-0,20 m foi amostrada para análises químicas de acordo com metodologia descrita por van Raij *et al.* (2001), apresentando as seguintes características: fósforo (P_{resina}): 2,0 mg·dm⁻³; matéria orgânica do solo (MOS): 14,0 g·dm⁻³; pH (CaCl₂): 5,0; potássio trocável (K⁺): 1,1 mmolc·dm⁻³; cálcio trocável (Ca⁺²): 10,0 mmolc·dm⁻³; magnésio trocável (Mg⁺²): 6,0 mmolc·dm⁻³; acidez potencial a pH 7 (H+Al): 16,0 mmolc·dm⁻³; soma de bases (SB): 17,1 mmolc·dm⁻³ e saturação por bases (V%): 52,0%; capacidade de troca catiônica (CTC): 33,1 mmolc·dm⁻³; enxofre (S-SO₄): 5,0 mg·dm⁻³; boro (B): 0,03 mg·dm⁻³; cobre (Cu⁺²): 0,6 mg·dm⁻³; ferro (Fe⁺²): 19,0 mg·dm⁻³; manganês (Mn⁺²): 5,5 mg·dm⁻³; zinco (Zn⁺²): 0,3 mg·dm⁻³. A adubação de semeadura e cobertura foi realizada conforme recomendação para solos do Cerrado de acordo com Souza & Lobato (2004), considerando uma população de 100.000 plantas·ha⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x4x2 em 3 repetições totalizando 48 parcelas experimentais, constituído por: 2 – sem ou com aplicação de regulador de crescimento (cloreto de mepiquat 200 mL·ha⁻¹, produto comercial Pix HC 250 g·L⁻¹); 4 – subdoses de herbicida 2,4-D (produto comercial DMA 806 BR 670 g·L⁻¹): 0, 0,68, 2,04 e 3,40 g e.a.·ha⁻¹ (Furlani Júnior *et al.*, 2011) e; 2 – sem ou com deficiência hídrica. Os vasos de 15 L inicialmente foram individualmente irrigados lentamente, com auxílio de proveta graduada, para determinar sua capacidade de campo e posteriormente, aplicação do tratamento de disponibilidade hídrica.

Em cada vaso foram semeadas 6 sementes de algodão (Figura 6), cultivar FM 974 GLT, a uma profundidade de 3,0 cm, sendo posteriormente desbastadas plântulas para resultar em estande final de três plantas equidistantes por vaso, irrigadas por aspersão mantendo solo em capacidade de campo até aplicação dos tratamentos, posteriormente, no tratamento sob deficiência hídrica o solo foi mantido à 25% da capacidade de campo até os 50 dias após a emergência das plântulas (DAE) onde cessou-se a irrigação. Aos 30 DAE foi aplicada a primeira parcela de regulador de crescimento (10% de 200 mL ha⁻¹), aos 40 DAE efetuou-se a segunda aplicação parcelada de regulador de crescimento (20% de 200 mL ha⁻¹), aos 43 DAE iniciou a aplicação das subdoses de 2,4-D para estimular efeito hormético de crescimento do caule, aos 50 DAE foi realizada a terceira parcela da aplicação de regulador de crescimento (30% de 200 mL ha⁻¹), aos 53 DAE foram aplicadas segundas doses de 2,4-D nas plantas para retomarem seu desenvolvimento e por fim, aos 60 DAE a quarta parcela de regulador de crescimento (40% de 200 mL ha⁻¹). Os tratamentos foram aplicados utilizando pulverizador de acionamento manual com pressão constante de 2,5 BAR (≈36 PSI) e ponta tipo cone vazio com espectro de gotas médias. Posteriormente, aos 70 DAE, em cada planta foram analisadas as trocas gasosas, índice SPAD, altura de plantas e suas folhas colhidas para extração e análises de perfis metabólicos.

Figura 6 – Plântulas de algodão recém emergidas em uma das repetições, antes de serem desbastadas.



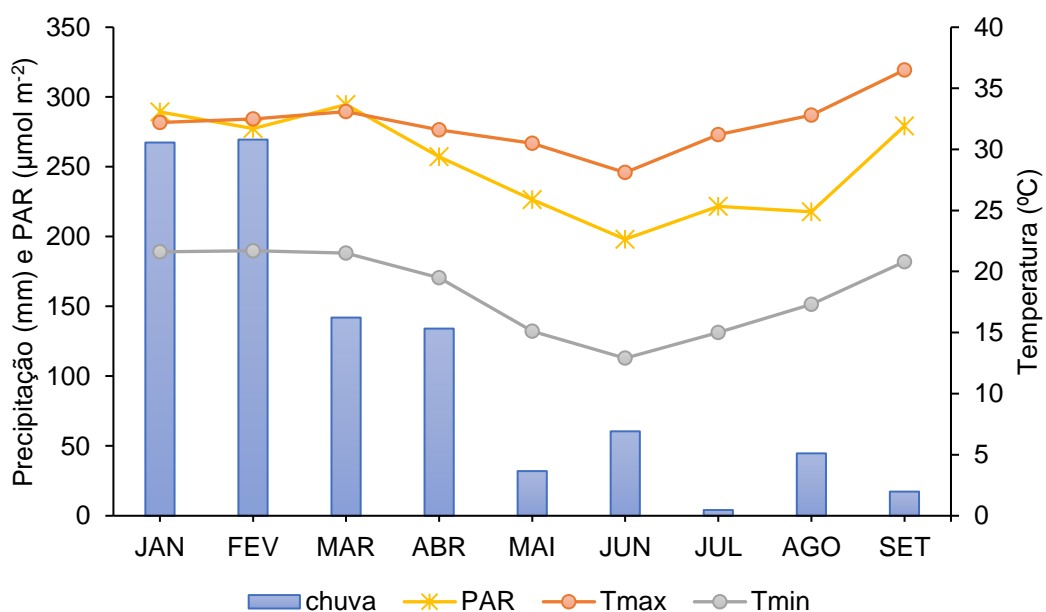
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

3.2 Caracterização do experimento 2

O segundo experimento foi instalado no dia 23 de dezembro de 2022, na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP) na safra 2022/23, localizada no município de Selvíria – MS, com coordenadas geográficas 20° 20' 45" de Latitude Sul e 51° 24' 11" de Longitude Oeste e com altitude média de 335 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, e vegetação caracterizada por bioma de Cerrado. Apresenta temperatura média anual de 24,5 °C, precipitação média anual de 1.232 mm e umidade relativa média anual de 64,8% (Hernandez *et al.*, 1995).

Durante a condução do experimento houve necessidade de irrigação suplementar apenas no período de semeadura, por ser um ano atípico com alta intensidade de precipitação, conforme observado na Figura 7, os meses de janeiro e fevereiro foram os mais chuvosos com volume de chuva acumulado em 267,4 e 269,5 mm, respectivamente.

Figura 7 – Valores médios mensais de Precipitação, Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), Temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e Temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$) durante o período de janeiro à setembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2024.

O solo da área experimental foi amostrado para caracterização das propriedades químicas de acordo com a metodologia de análise proposta por van Raij *et al.* (2001), sendo posteriormente calculada a adubação de semeadura e cobertura. Em seguida, foram semeadas 13,3 sementes por metro e adubação de semeadura sendo 300 kg ha⁻¹ do formulado 8-28-16 no sulco de semeadura. A cultivar utilizada foi FM 974 GLT que, de acordo com a empresa BASF, se destaca por apresentar alto potencial produtivo e boa qualidade de fibra, possui taxa de crescimento médio e alta taxa de retenção de capulho, com ciclo de produção é de 170 a 190 dias e resistência à doença azul. Além disso, a variedade apresenta tecnologia GLT (GlyTol[®]-LibertyLink[®]-TwinLink[®]), que confere a planta maior tolerância aos herbicidas *Glyphosate* e glufosinato de amônio, e dois genes Bt de resistência a lepidópteros (Cry1Ab e Cry2Ae), eficaz no manejo de curuquerê (*Alabama argillacea*), lagarta-damaçã (*Heliothis virescens*), lagarta militar (*Spodoptera frugiperda*), lagarta-rosada (*Pectinophora gossypiella*) e falsa medideira (*Chrysodeixis includens*).

A parcela experimental foi constituída por 4 linhas de cultivo com 5 metros de comprimento, espaçadas a 0,90 m entrelinhas, ocupando área de 18,0 m² por parcela e uma área experimental total de 576,0 m². Foram consideradas como área útil as duas linhas centrais de cada parcela e, após a emergência das plântulas foi realizado desbaste, deixando 8 plantas por metro linear, totalizando população de aproximadamente 90 mil plantas de algodão por hectare.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos completos ao acaso em esquema fatorial 2x4 com 4 repetições, totalizando 32 parcelas experimentais. Os tratamentos foram constituídos por: 2 – sem ou com aplicação de regulador de crescimento (cloreto de mepiquat 200 mL·ha⁻¹, produto comercial Pix HC 250 g·L⁻¹); e 4 – subdoses de herbicida 2,4-D (produto comercial DMA 806 BR 670 g·L⁻¹): 0, 0,68, 2,04 e 3,40 g e.a.·ha⁻¹.

As aplicações das subdoses do herbicida 2,4-D foram realizadas de forma manual no período da manhã via foliar aos 45 dias após a emergência (DAE), quando as plantas estavam no início do período reprodutivo (estádio de botões florais), e sequenciais a cada sete dias após a última aplicação, sendo utilizado pulverizador costal de pressão constante à 2,5 BAR (36 PSI) e calibrado para taxa de aplicação de 250 L ha⁻¹.

Aos 48 DAE foi aplicada a primeira parcela de regulador de crescimento (cloreto de mepiquat, 10% de 200 mL·ha⁻¹), aos 55 DAE efetuada a segunda aplicação parcelada de regulador de crescimento (20% de 200 mL·ha⁻¹), aos 62 DAE foi realizada a terceira parcela da aplicação de regulador de crescimento (30% de 200 mL·ha⁻¹), e por fim, aos 69 DAE a quarta parcela de regulador de crescimento (40% de 200mL·ha⁻¹). A aplicação foi de forma manual via foliar no início da manhã utilizando pulverizador costal e calibrado para taxa de aplicação de 250 L ha⁻¹. Posteriormente, em cada parcela foram analisadas as variáveis biométricas de altura de plantas, diâmetro de caule, número de ramos, número de estruturas reprodutivas, número de capulhos por planta e colheita de plumas para determinar a produtividade de algodão em caroço.

3.3 Índice SPAD e Parâmetros de trocas gasosas

Determinou-se o índice SPAD na quinta folha completamente expandida, a partir do ápice. As medições foram realizadas no período diurno, utilizando o medidor portátil de clorofila SPAD-502 Plus (Konica Minolta Sensing Americas, New Jersey, USA). Sendo realizadas cinco medições por folha após a aplicação dos tratamentos, na região entre as nervuras centrais de cada lóbulo do limbo foliar de cada planta da parcela, totalizando 15 medições por parcela, em cada tratamento, sendo utilizada a média para representar os tratamentos.

Os parâmetros de trocas gasosas foram mensurados utilizando analisador portátil de gás por infravermelho, IRGA (LCpro-SD, ADC, Hoddesdon, UK), usado para mensurar fotossíntese (A , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), e concentração intercelular de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) na quinta folha jovem completamente expandida da haste principal (folha diagnóstica). As medições foram realizadas externamente à casa de vegetação com radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ no período da manhã entre as 9:00 e 11:00 h à 30 ± 2 °C de temperatura foliar e concentração de CO_2 ambiente de 385 ± 5 ppm.

3.4 Análise biométrica de plantas

As características agronômicas foram realizadas em três plantas escolhidas ao acaso em cada parcela. As variáveis analisadas são referentes ao crescimento, sendo avaliadas após a aplicação das subdoses de herbicida e regulador de crescimento, sendo elas:

- **Altura de plantas:** realizada com auxílio de trena, sendo medido do colo até a última ramificação do meristema apical;
- **Diâmetro do caule:** realizado com auxílio de paquímetro, na altura de 2,0 cm em relação ao solo;
- **Número de ramos:** realizado por contagem do número de nós das mesmas plantas onde serão avaliadas a altura;
- **Número de estruturas reprodutivas:** contagem de estruturas reprodutivas (botão floral, flor e maçã);
- **Número de capulhos por planta:** contagem dos capulhos das mesmas plantas selecionadas para avaliação de altura antes da colheita;
- **Produtividade de algodão em caroço:** colheita das linhas centrais de forma manual, pesagem e estimativa para produtividade em kg ha^{-1} .

3.5 Extração de compostos nitrogenados e açucarados

Para análise de perfil de metabólitos o material vegetal foi extraído de acordo com a metodologia adaptada descrita por Bialeski e Turner (1966). As folhas foram pesadas, separados 1,0 g de material vegetal fresco e macerado em 10 mL de solução MCW (60% metanol, 25% clorofórmio e 15% água), a solução contendo o extrato vegetal é armazenada em tubos *falcon* de 15 mL, homogeneizada em vórtex e centrifugada à 6.000 rpm durante 15 minutos à 4 °C, e armazenada em refrigerador durante 48 horas. Após este período, extraiu-se 4 mL do sobrenadante transferindo-o para outro tubo *falcon* de 15 mL, adicionando 1,5 mL de água deionizada e 1 mL de clorofórmio, e armazenou-se em refrigerador durante 24 horas para a separação de fase lipossolúvel e hidrossolúvel (Figura 8), da qual foram feitas as análises de açúcares solúveis totais, nitrato e amônia.

Figura 8 – Extração de compostos em MCW para análise de perfil de metabólitos, com ênfase na etapa de separação de fases lipossolúvel e hidrossolúvel.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A concentração de açúcares totais foi determinada de acordo com a metodologia de Dubois *et al.* (1956), sendo adicionados 25 μL de extrato vegetal, 500 μL de fenol 5% e 2 mL de H_2SO_4 concentrado, lentamente, em tubos de vidro. Esta mistura é homogeneizada em vórtex e, após resfriar em temperatura ambiente, seguiu-se a leitura no espectrofotômetro em absorvância no comprimento de onda $\lambda = 490 \text{ nm}$.

A concentração de nitrato foi determinada de acordo com o método descrito por Cataldo *et al.* (1975). Do extrato da fase hidrossolúvel foi usada alíquota de 10 μL de amostra, 40 μL de ácido salicílico 5% em H_2SO_4 (p/v). Após 20 minutos em temperatura ambiente, foi acrescentado 1 mL de NaOH 2N, lentamente. O ensaio é mantido em temperatura ambiente e, após resfriar, foram realizadas as leituras em espectrofotômetro em $\lambda = 410 \text{ nm}$. A concentração de nitrato foi determinada utilizando-se curva padrão de solução nitrato de cálcio. Os resultados expressos em $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ MF.

A concentração de amônia foi quantificada de acordo com a metodologia descrita por McCullough (1967). Adicionando-se 200 μL de extrato, 500 μL de solução

fenol (2,5 g de fenol e 12,5 mg de nitroprussiato de sódio em volume final de 250 mL) e 500 µL de solução fosfato (1,25 g NaOH, 7,099 g Na₂HPO₄ e 2,5 mL NaOCl 5%, para 250 mL). As amostras foram incubadas a 37 °C durante 1 h. A leitura foi realizada por espectrofotometria no comprimento de onda $\lambda = 630$ nm em absorbância. A concentração de amônia foi determinada através de curva padrão de solução sulfato de amônio e os resultados expressos em $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ MF.

3.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de significância. No caso de interação significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância para os caracteres qualitativos (regulador de crescimento e disponibilidade hídrica) e aplicada regressão ($p < 0,05$) para os caracteres quantitativos (subdoses de 2,4-D) sendo selecionado o melhor ajuste polinomial ao conjunto de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento 1

De acordo com a Tabela 1, observou-se que as variáveis analisadas: índice SPAD, fotossíntese e transpiração apresentaram interação tripla de acordo com o teste F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$. Sendo posteriormente desdobradas para cada nível de fator dos tratamentos. Para as demais variáveis analisadas, houve interações duplas para alguns fatores de acordo com sua relação em função da disponibilidade hídrica do solo (D.H.), a aplicação do regulador de crescimento (R.C.) e a aplicação de subdoses do herbicida 2,4-D (2,4-D).

Tabela 1 – Análise de variância (quadrados médios) para os parâmetros: índice SPAD (SPAD), fotossíntese (A), concentração intercelular de CO₂ (Ci), condutância estomática (gs) e transpiração (E).

FV	GL	Quadrados médios				
		SPAD	A	Ci	g _s	E
D.H.	1	581,02**	36,56**	5002,08 ^{ns}	0,008269*	1,99**
R.C.	1	391,02**	9,51**	12160,33**	0,000019 ^{ns}	0,01 ^{ns}
2,4-D	3	414,92**	77,63**	30585,69**	0,008858*	0,93**
D.H. x R.C.	1	72,03**	1,77 ^{ns}	4800,00 ^{ns}	0,000002 ^{ns}	0,68*
D.H. x 2,4-D	3	31,30**	11,32**	5459,69*	0,006408*	1,37**
R.C. x 2,4-D	3	48,40**	6,52**	4512,28 ^{ns}	0,003347*	1,83**
D.H. x R.C. x 2,4-D	3	19,03**	6,40**	4506,39 ^{ns}	0,000219 ^{ns}	0,33*
resíduo	32	6,77	0,72	1731,60	0,000288	0,12
média geral	-	23,17	3,00	257,96	0,044375	1,05
CV (%)	-	11,23	28,27	16,13	38,21	33,09

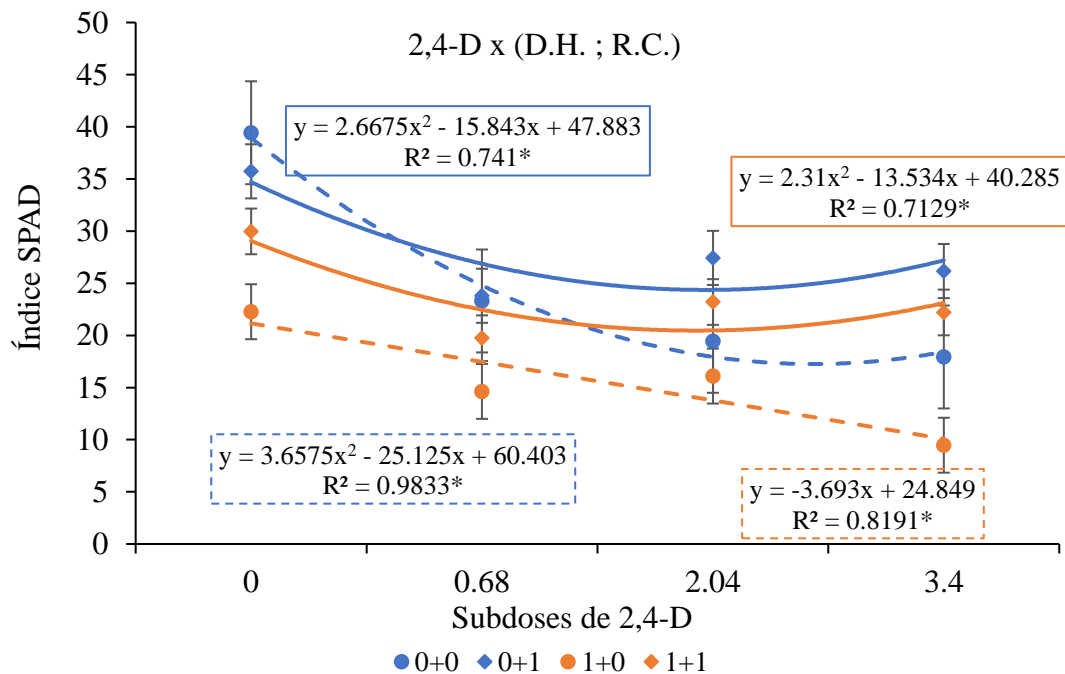
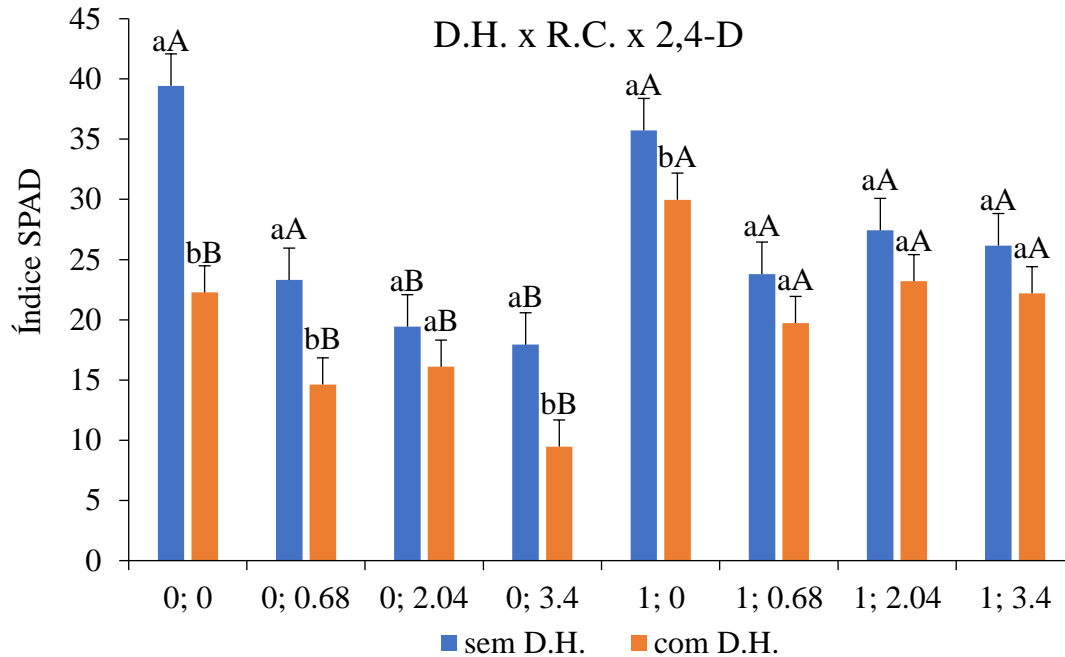
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: * e ** significativos à $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente; ^{ns} = não significativo.

O desdobramento da interação para o índice SPAD pode ser observado no Gráfico 1, ao ser considerada a disponibilidade hídrica como fator principal, observou-se redução significativa no índice SPAD para todos os tratamentos, sendo mais acentuada em baixa disponibilidade hídrica (36,23%) em relação às plantas bem hidratadas (15,95%). Entretanto, a aplicação de regulador de crescimento em condições de baixa disponibilidade hídrica resultou em folhas 61,99% mais verdes, assim como os resultados encontrados por Tahaei *et al.* (2022) no cultivo de milho,

diferindo do que foi observado pela aplicação de herbicida 2,4-D que por sua vez, independente da subdose aplicada, reduziu a cor verde das folhas em 41,67%.

Gráfico 1 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D no índice SPAD.

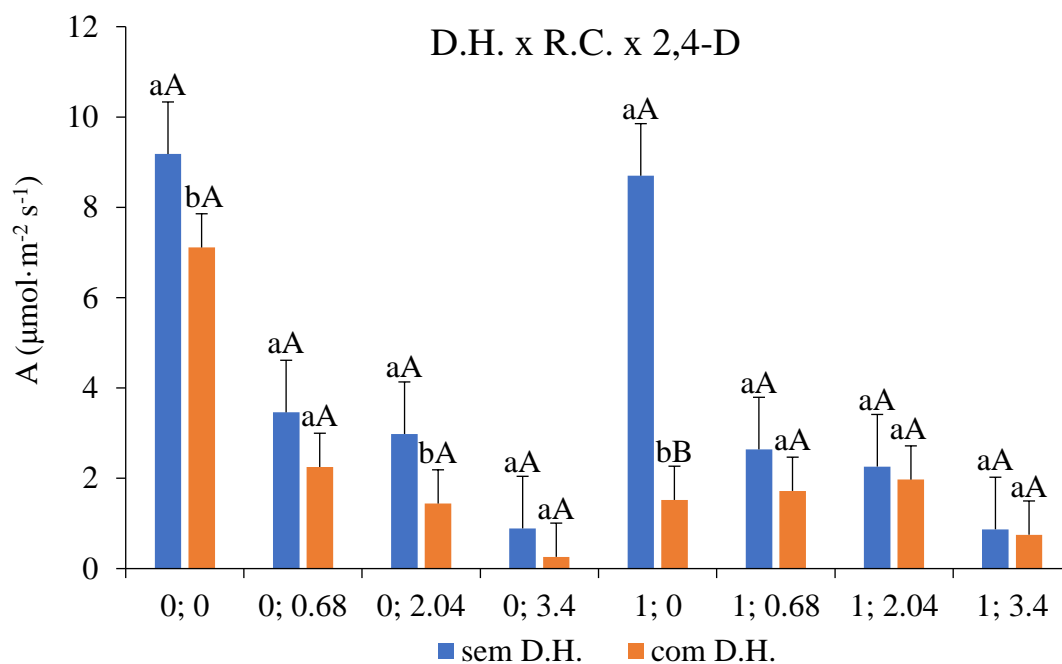


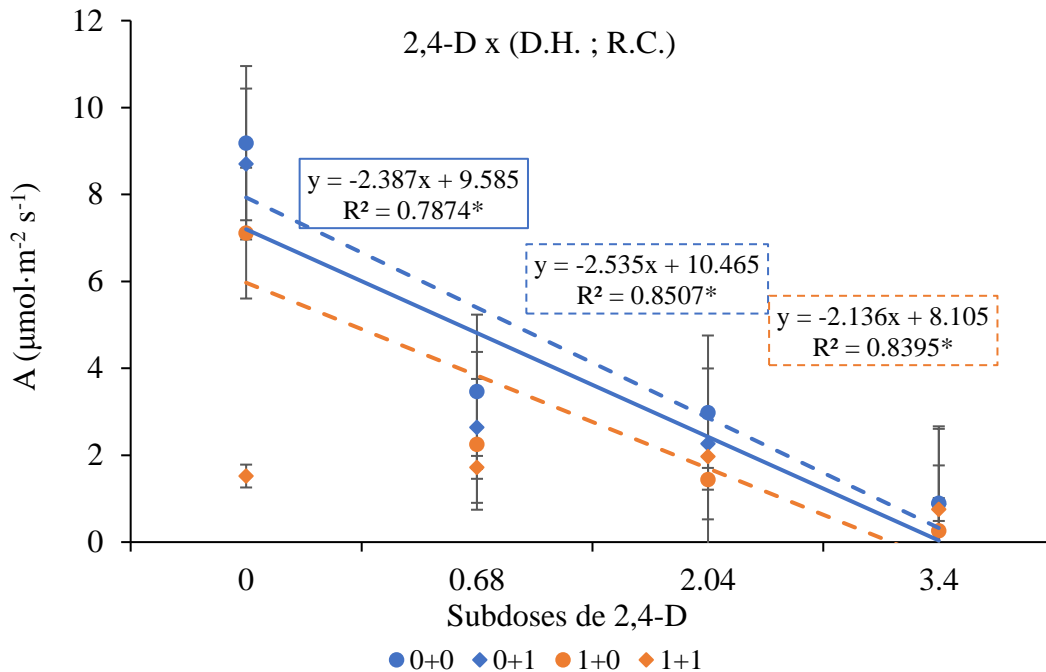
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. n = 3. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

A fotossíntese (Gráfico 2) foi muito maior no tratamento controle, onde não houve aplicação de 2,4-D, regulador de crescimento ou redução da disponibilidade hídrica pela cultura, correspondendo pelas maiores taxas fotossintéticas de 9,18 e 8,7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. De modo geral, apenas a redução da disponibilidade hídrica resultou em decréscimo de 213% da taxa fotossintética. De acordo com He *et al.* (2022), a seca prolongada no algodoeiro reduziu significativamente a taxa fotossintética, condutância estomática e suprimiu a atividade da Rubisco, diminuindo também o número de folhas e a área foliar do algodão. A aplicação de regulador de crescimento junto com as maiores subdoses de 2,4-D também resultaram em menor fotossíntese pelas plantas.

Gráfico 2 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na fotossíntese.



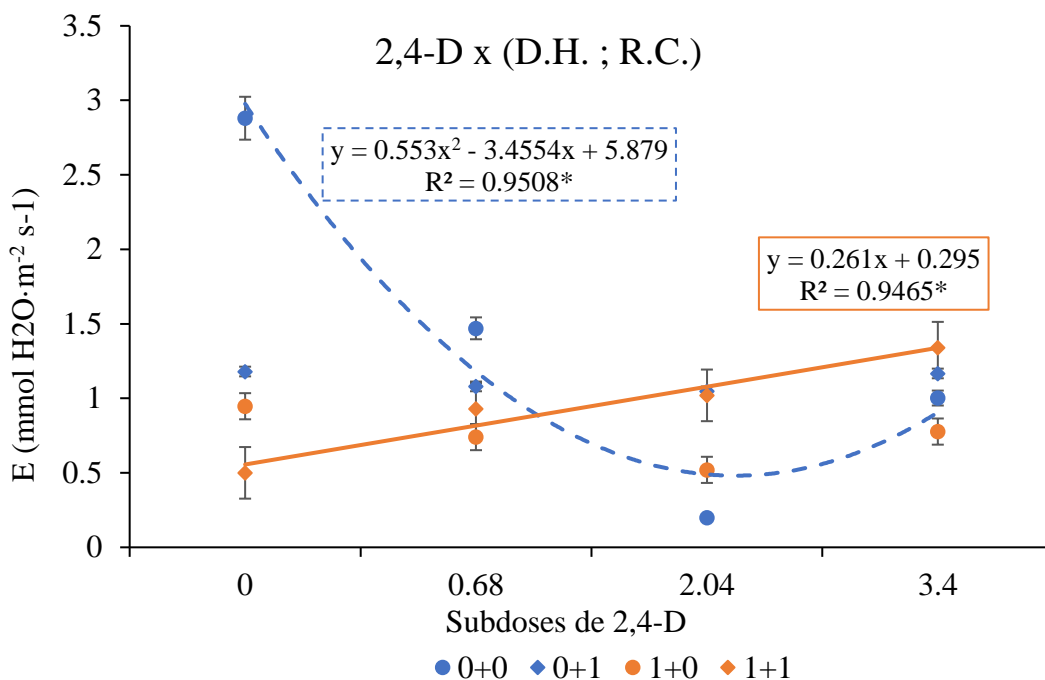
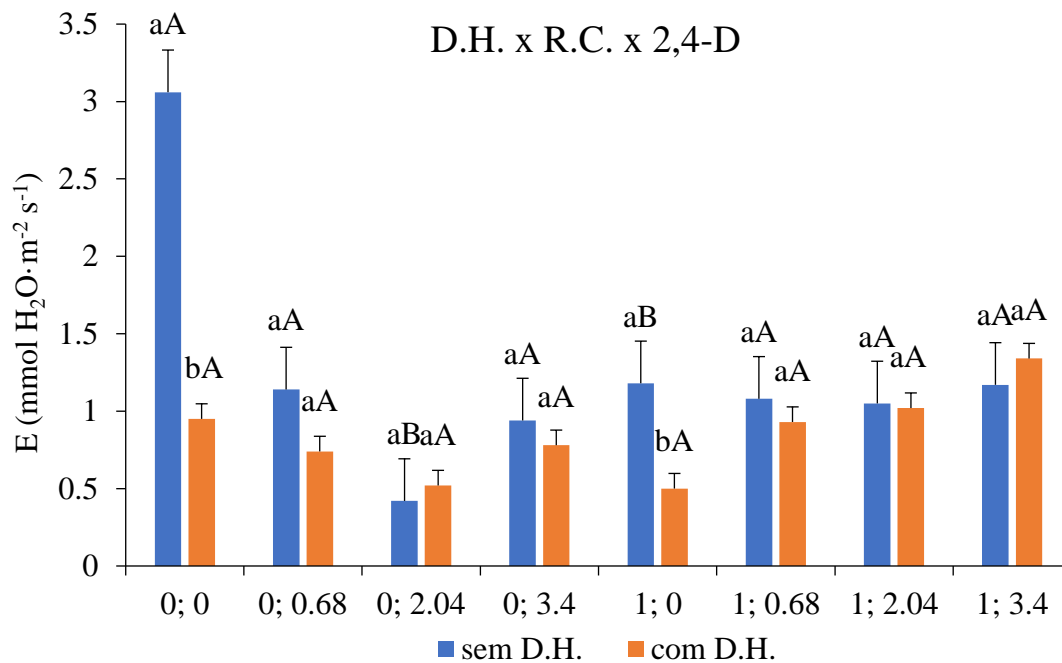


Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

A transpiração foi reduzida pela seca, sendo mais pronunciada nos tratamentos onde não houve aplicação de regulador de crescimento ou subdoses de 2,4-D (Gráfico 3). A aplicação de regulador de crescimento em plantas sob boas condições hídricas e que não foram tratadas com subdose de 2,4-D, resultou em menor transpiração que pode ser devido à inibição do crescimento. As plantas tratadas com regulador de crescimento que estavam sob seca e receberam aplicação de 2,4-D manifestaram crescente taxa de transpiração, 0,5 a 1,34 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ até a maior dose do herbicida, equivalente ao aumento de 268% na transpiração, podendo ser devido à retomada do crescimento pela produção de raízes ou absorção de nutrientes em camadas mais profundas.

Gráfico 3 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na transpiração.



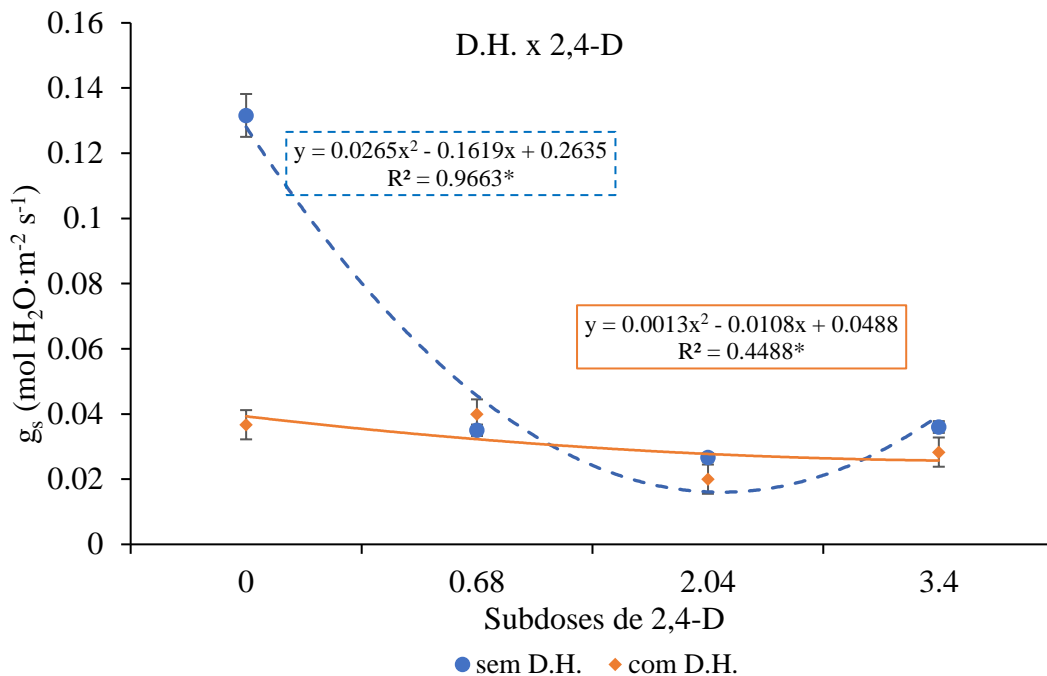
Fonte: Elaborado pelos autores.

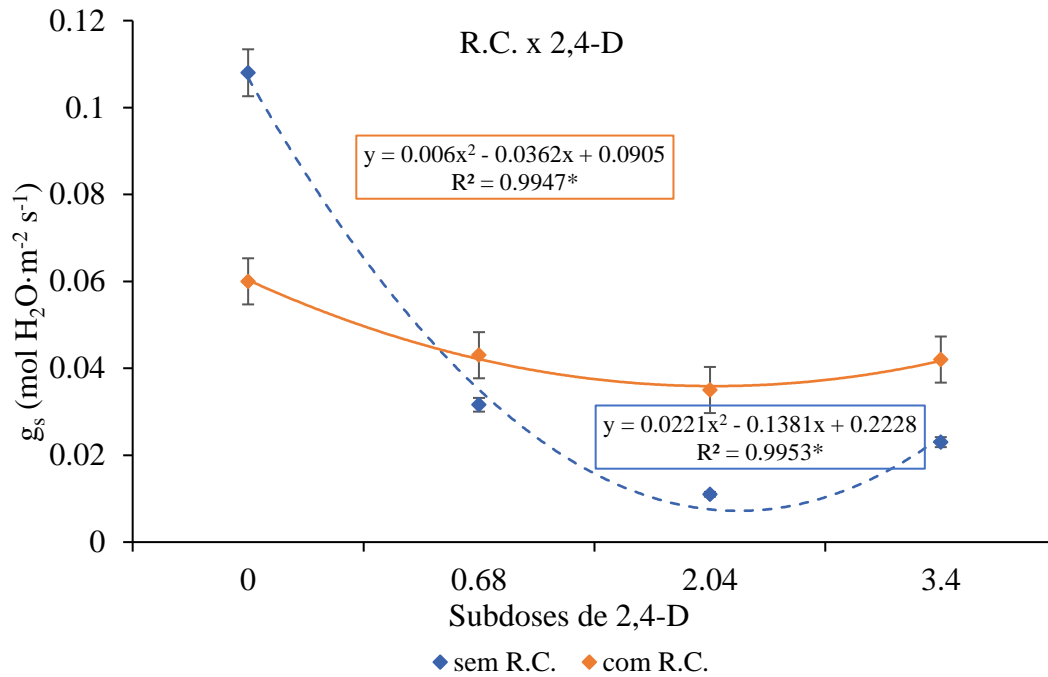
Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

A condutância estomática foi significativamente menor em plantas sob menor conteúdo de água disponível (Gráfico 4), apresentando também menor transpiração

(Gráfico 3), assim como foi observado anteriormente. Esse mecanismo é muito comum em espécies que realizam ajuste osmótico, como o algodão, sendo uma das estratégias utilizadas para evitar desidratação e conseguirem minimizar os efeitos adversos da seca em seu metabolismo. Além disso, a subdose de 2,04 g ha⁻¹ de 2,4-D nas parcelas não tratadas com regulador de crescimento proporcionou menor condutância estomática, aumentando a resistência à transpiração 10 vezes em relação ao tratamento controle (Gráfico 4), concordando com os mesmos resultados obtidos por Tahaei *et al.* (2022).

Gráfico 4 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica e herbicida, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na condutância estomática.

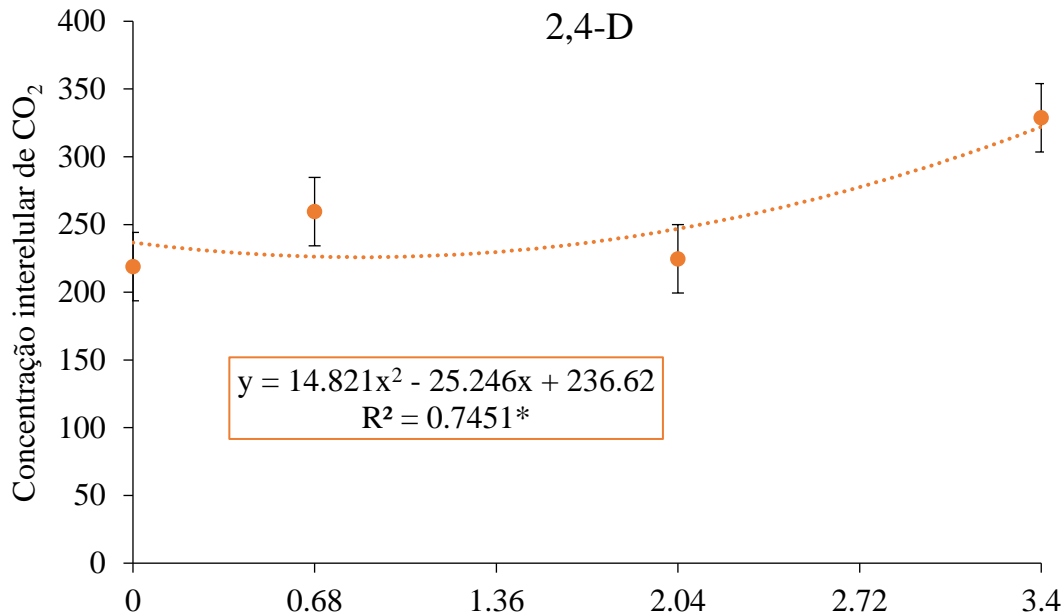




Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: análise de regressão para subdoses de 2,4-D à $p < 0,05$. $n = 3$.

As baixas doses de 2,4-D utilizadas também favoreceram maior acúmulo de CO_2 intercelular (Gráfico 5), provavelmente pelo rápido aprisionamento devido ao fechamento estomático. As auxinas não atuam diretamente na regulação de estômatos, esta é uma função característica do ABA que se acumula nas células-guarda estimulando a produção de espécies reativas de oxigênio que ativam o influxo de Ca^{+2} , bloqueando bombas de prótons e promovendo efluxo de K^+ e Cl^- dos estômatos, tornando-os flácidos (Taiz; Zeiger, 2013).

Gráfico 5 – Doses de herbicida 2,4-D na concentração intercelular de CO₂.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: análise de regressão para subdoses de 2,4-D à $p < 0,05$. $n = 3$.

Para as variáveis da Tabela 2, após as médias serem comparadas pelo teste F à $p < 0,05$, verificou-se interação tripla para todas as variáveis analisadas.

Tabela 2 – Análise de variância (quadrados médios) para os parâmetros: altura de plantas (ALT), açúcares solúveis totais (AST), nitrato (NO₃⁻) e amônia (NH₃).

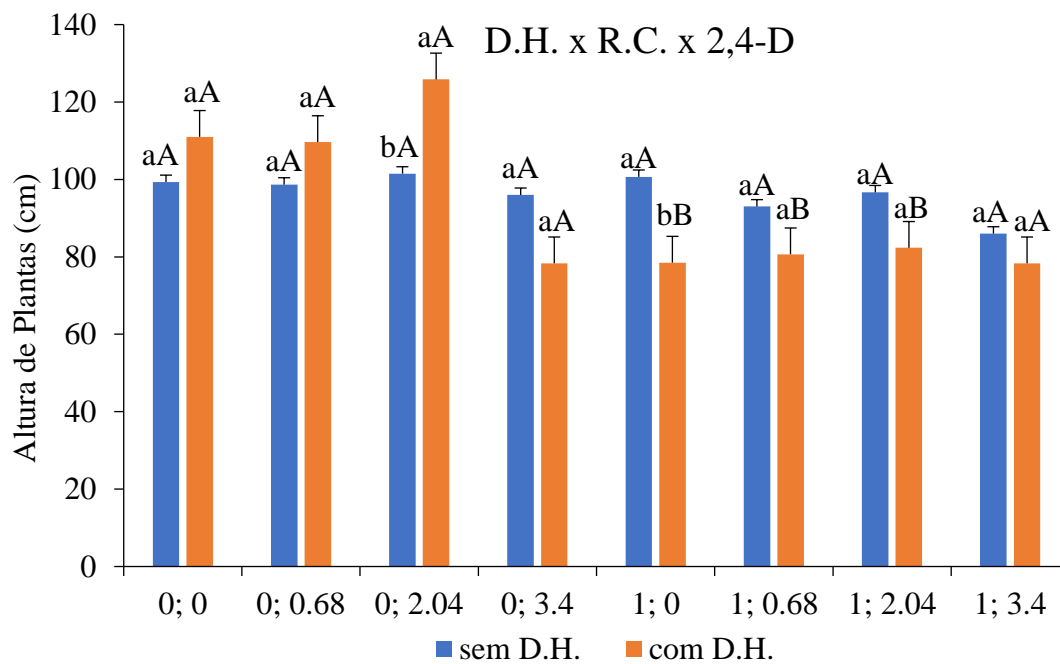
FV	GL	Quadrados médios			
		ALT	AST	NO ₃ ⁻	NH ₃
D.H.	1	138,38 ^{ns}	925,41 ^{**}	110711,07 ^{**}	0,57 ^{ns}
R.C.	1	2890,75 ^{**}	2280,04 ^{**}	3072,96 ^{ns}	0,96 ^{ns}
2,4-D	3	623,27 ^{**}	7971,09 ^{**}	191713,42 ^{**}	6,75 ^{**}
D.H. x R.C.	1	1381,38 ^{**}	548,91 ^{**}	71007,93 [*]	0,005 ^{ns}
D.H. x 2,4-D	3	167,32 ^{ns}	1128,08 ^{**}	221750,33 ^{**}	1,63 ^{**}
R.C. x 2,4-D	3	188,73 ^{ns}	2291,46 ^{**}	775944,65 ^{**}	9,31 ^{**}
D.H. x R.C. x 2,4-D	3	360,60 [*]	3641,83 ^{**}	147245,92 ^{**}	4,63 ^{**}
resíduo	32	119,25	57,03	16808,44	0,27
média geral	-	94,78	231,68	1768,98	16,74
CV (%)	-	11,52	3,26	7,33	3,10

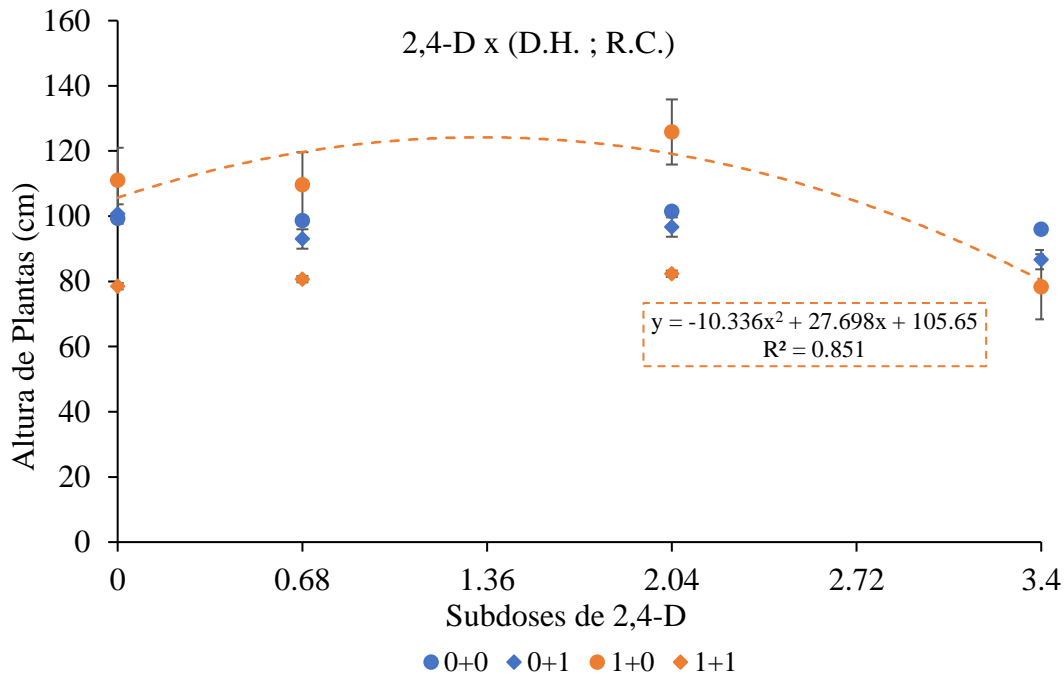
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: * e ** significativos à $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente; ^{ns} = não significativo.

Outro efeito observado pelas subdoses de 2,4-D aplicadas via foliar foi no estímulo de crescimento e alongamento do caule das plantas de algodão (Gráfico 6), mesmo após serem tratadas com inibidores de giberelinas. Conforme aumentou-se a subdose do herbicida até 2,68 g e.a.·ha⁻¹, houve maior crescimento em altura, resultando em plantas 25% mais altas em relação àquelas tratadas apenas com regulador de crescimento.

Gráfico 6 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na Altura de plantas.





Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

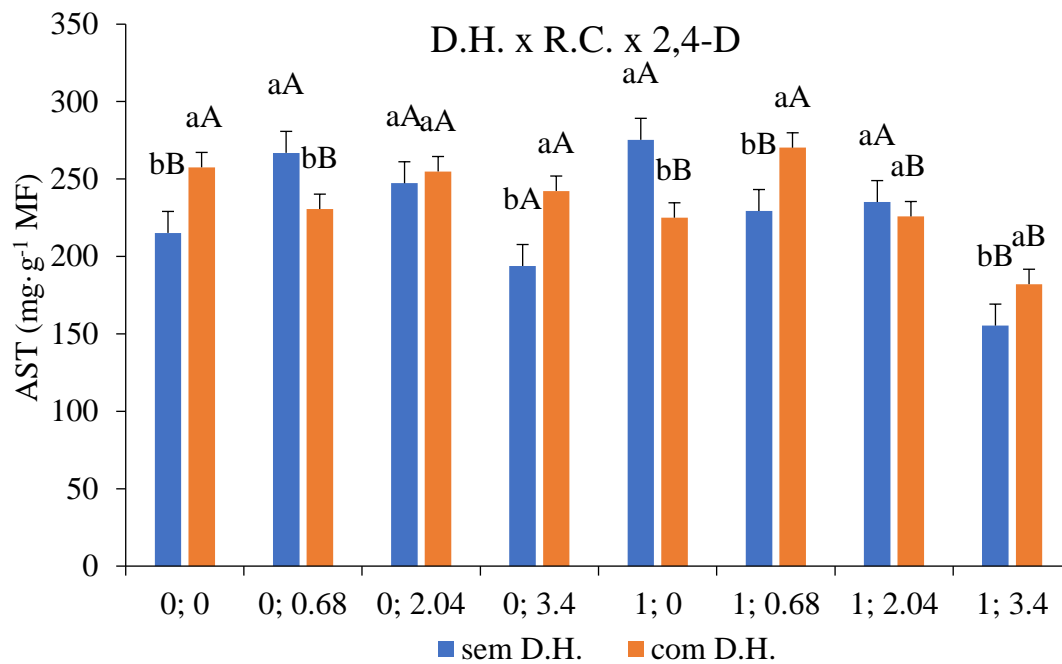
No metabolismo vegetal, auxinas promovem o enraizamento das plantas e aliadas às giberelinas AG1, atuam no alongamento celular, estimulando o crescimento em altura dos vegetais. Uma das hipóteses para esse crescimento se dá pela acidificação do apoplasto, ocasionando afrouxamento da parede celular e ativação de expansinas que alteram a extensibilidade dessa parede em resposta ao pH ácido (Taiz; Zeiger, 2013). As plantas de algodão mais altas foram observadas nos tratamentos sob baixa disponibilidade hídrica tratadas com subdoses de 2,4-D, reforçando o resultado observado anteriormente pela ação das auxinas no crescimento do caule.

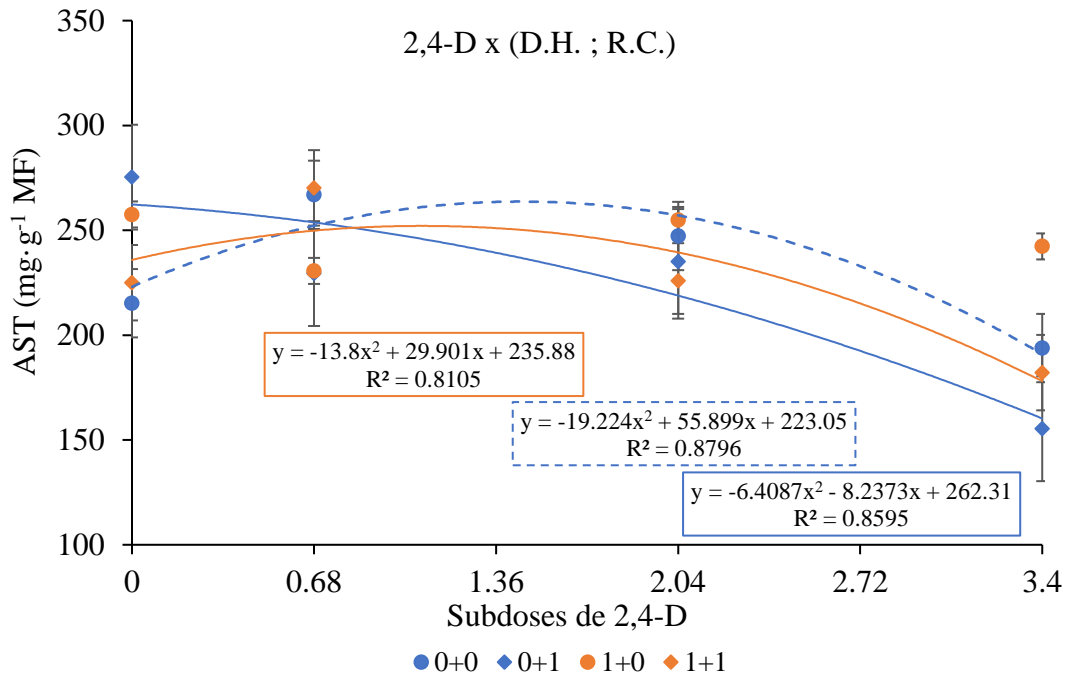
Algumas espécies vegetais possuem mecanismos de adaptação para sobrevivência em ambientes sujeitos à seca, dentre elas, o algodoeiro caracteriza-se por realizar osmoregulação, promovendo maior acúmulo de solutos, como açúcares solúveis e prolina, que aumentam o potencial osmótico e consequentemente, reduzem o potencial hídrico das raízes, evitando a perda de água da planta para o solo (Quevedo *et al.*, 2022).

A aplicação de maiores subdoses de herbicida 2,4-D em algodão estimulou o acúmulo de açúcares solúveis nas folhas de plantas sob déficit hídrico (Gráfico 7),

assemelhando estatisticamente às plantas que estavam bem irrigadas e, em alguns casos, proporcionando concentrações mais elevadas no tecido vegetal. O acúmulo de açúcares solúveis em raízes ou outros órgãos vegetais pode auxiliar em condições de baixa disponibilidade hídrica por diminuir o potencial hídrico da planta em relação ao solo e, conseqüentemente, evitando a perda de água.

Gráfico 7 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de açúcares solúveis totais.



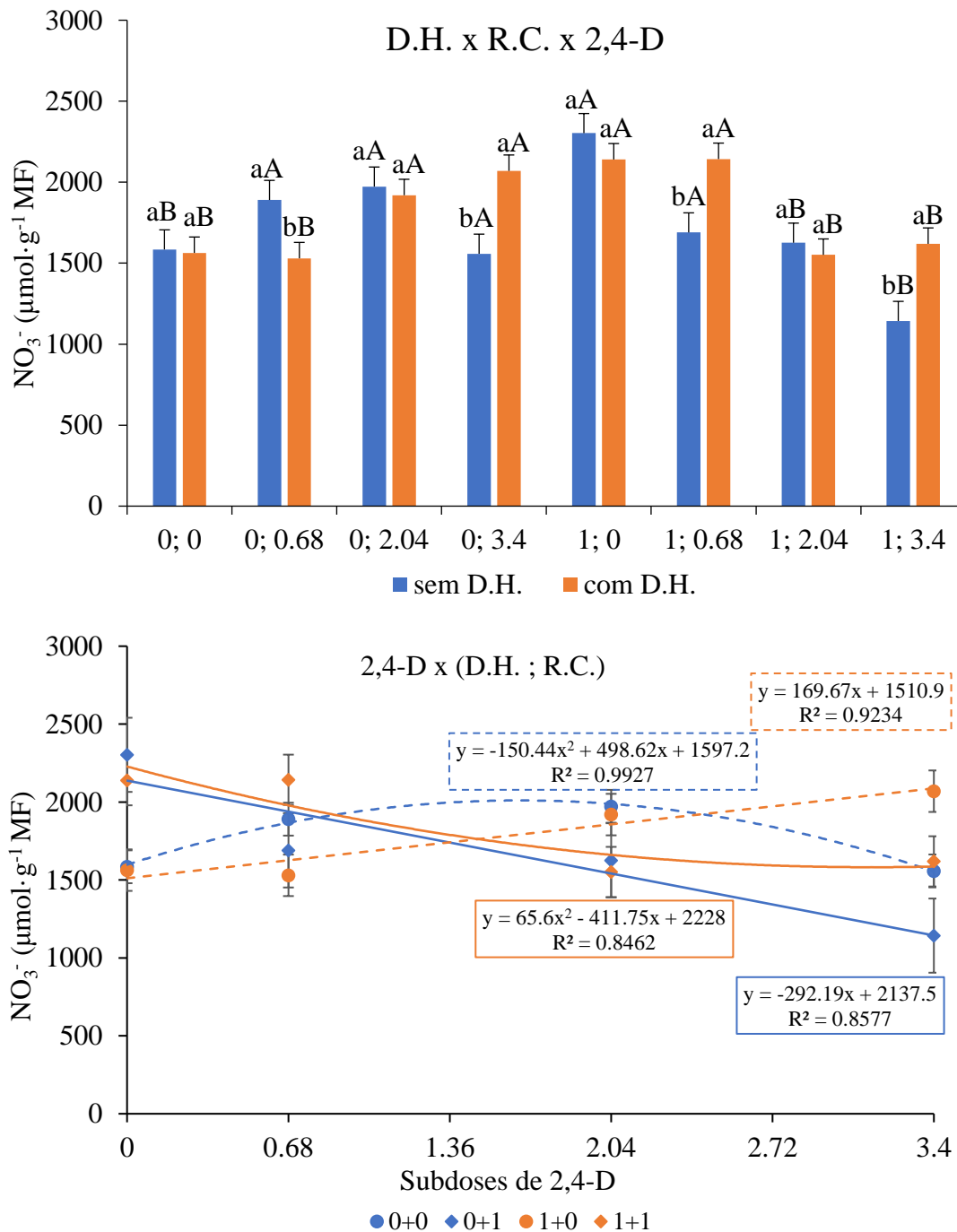


Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

A concentração de nitrato nas folhas das plantas de algodão apresentou comportamento distinto entre os tratamentos (Gráfico 8). Nas parcelas onde não houve aplicação de regulador de crescimento, o acúmulo deste elemento no tecido vegetal foi proporcional ao incremento das subdoses aplicadas de herbicida 2,4-D via foliar. Nas parcelas onde as plantas foram tratadas com regulador de crescimento, o acréscimo das subdoses via foliar proporcionou redução gradativa na concentração de nitrato, sendo estatisticamente inferiores nas plantas que receberam maior dose do herbicida. Outro fato observado foi o maior acúmulo de nitrato pelas plantas que se desenvolveram mais em relação àquelas de menor estatura, pois o nitrogênio é um importante macronutriente exigido para crescimento vegetativo, assumindo diversas funções no metabolismo vegetal.

Gráfico 8 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de nitrato foliar.

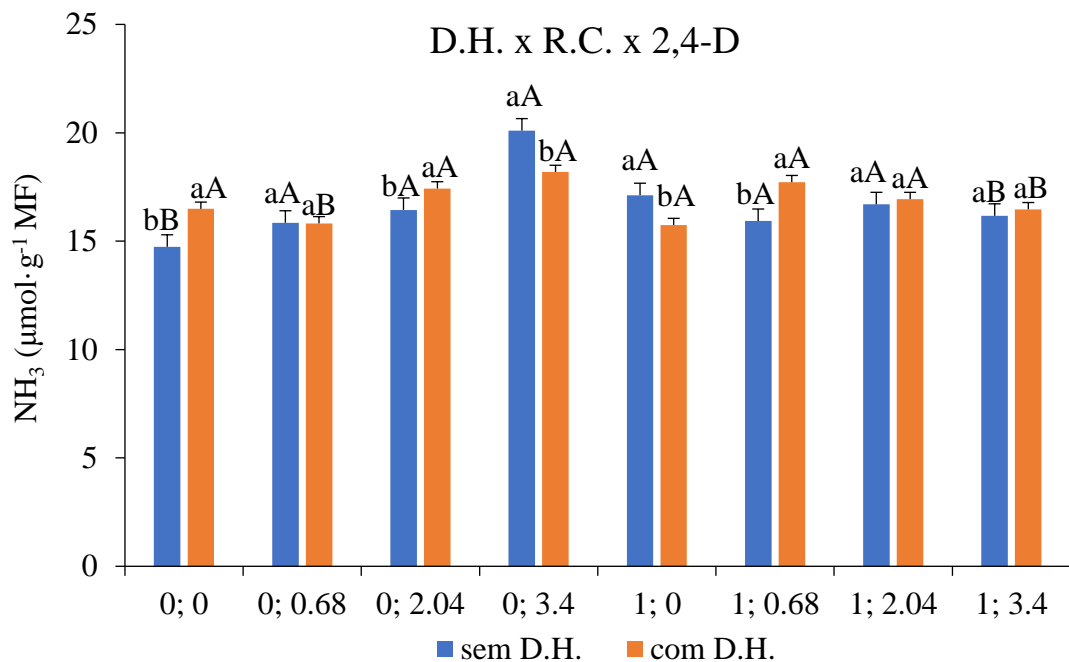


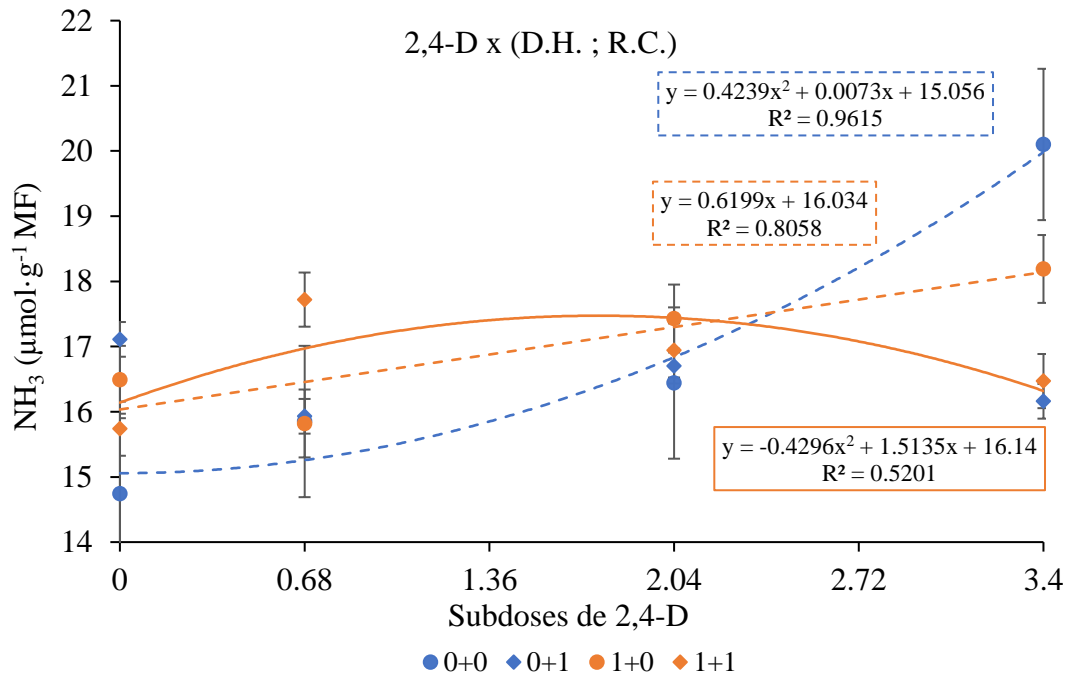
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

A concentração de amônia nos tecidos apresentou comportamento semelhante ao de nitrato (Gráfico 9), não tendo nenhuma característica predominante de acordo com a aplicação dos tratamentos, entretanto, as plantas que não foram tratadas com regulador de crescimento apresentaram concentrações crescentes de acordo com o aumento das subdoses de herbicida, podendo ser um indicativo de alta demanda para crescimento vegetativo da parte aérea ou assimilação em esqueletos de carbono.

Gráfico 9 – Desdobramento da interação de disponibilidade hídrica na cultura do algodoeiro, regulador de crescimento e doses de herbicida 2,4-D na concentração de amônia foliar.





Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras minúsculas diferem os tratamentos sob disponibilidade hídrica e letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 3$. D.H.: deficiência hídrica; R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida. 0+0: sem D.H. + sem R.C.; 0+1: sem D.H. + com R.C.; 1+0: com D.H. + sem R.C.; 1+1: com D.H. + com R.C.

Isto mostra que a maior concentração de amônia nos tecidos foliares em conjunto com baixas concentrações o 2,4-D faz com que esse herbicida atue de forma análoga às auxinas naturais, estimulando a síntese de RNA, DNA e proteínas (Taiz; Zeiger, 2013), além de promover incrementos no crescimento da planta e influenciar o desenvolvimento de botões florais.

4.2 Experimento 2

Os dados das variáveis biométricas obtidos foram submetidos a análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) e foram observadas diferenças significativas na interação entre a aplicação de regulador de crescimento e subdoses do herbicida aplicadas para as variáveis de Altura de Plantas, Diâmetro de caule e produtividade de algodão em caroço (Tabela 3). Entretanto, quando não significativa a interação, outras variáveis apresentaram significância de acordo com os tratamentos aplicados.

Tabela 3 – Análise de variância (Quadrados médios) das características agrônômicas do algodoeiro: Altura de plantas (ALT), Diâmetro de caule (DMT), número de ramos (N_RAMO), número de capulhos (N_CAP) e produtividade de algodão em caroço (PROD).

FV	GL	Quadrados médios				
		ALT	DMT	N_RAMO	N_CAP	PROD
bloco	3	81,07*	0,99 ^{ns}	0,96 ^{ns}	7,20*	1881933,50*
R.C.	1	1554,31*	79,25*	1,24 ^{ns}	13,34*	2789522,00*
2,4-D	3	174,35*	27,43*	5,03*	1,22 ^{ns}	219670,83 ^{ns}
R.C. x 2,4-D	3	11,15*	3,98*	0,17 ^{ns}	2,39 ^{ns}	559525,00*
resíduo	21	21,08	1,86	1,25	1,83	107508,26
média geral	-	161,24	17,99	16,11	9,75	2056,87
CV (%)	-	2,85	7,60	6,96	13,88	15,94

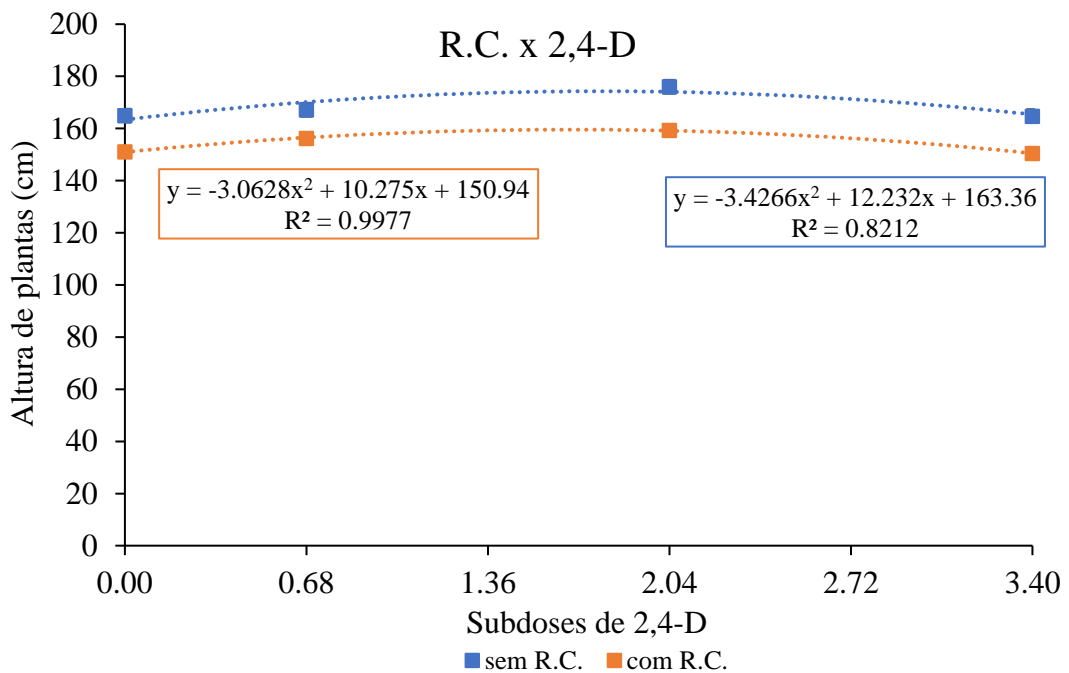
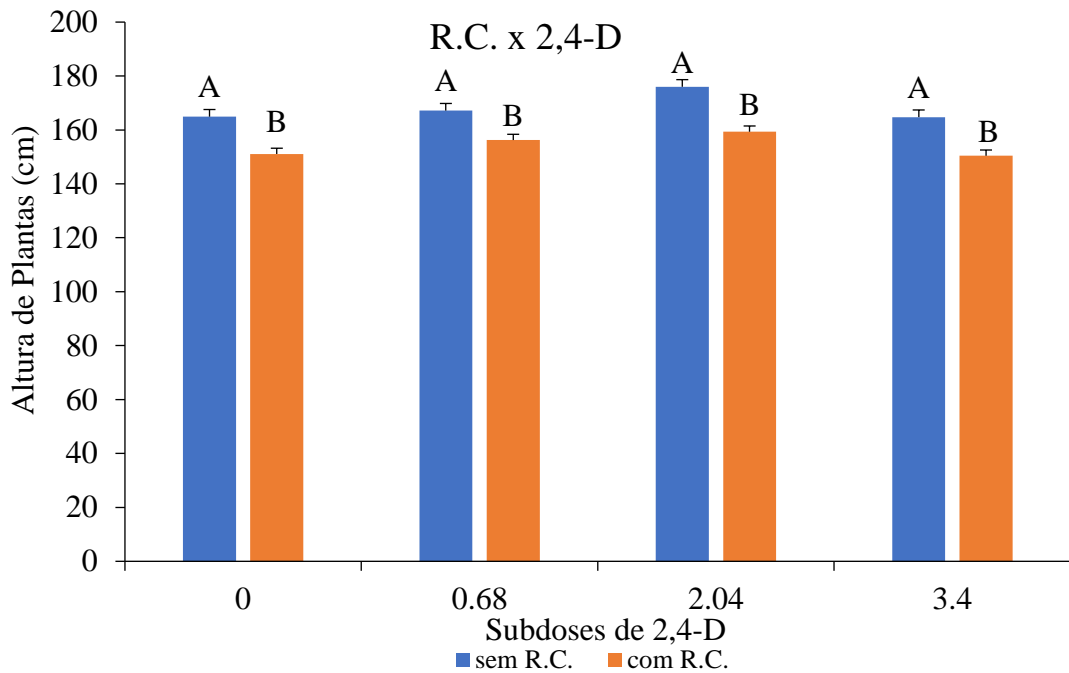
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: * significativo à $p < 0,05$; ^{ns} = não significativo.

Conforme observado para altura de plantas (Tabela 3), houve interação significativa para a aplicação de regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D, e ao realizar desdobramento dessa interação observou-se que as plantas tratadas com regulador de crescimento foram significativamente menores, de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$), em relação ao tratamento sem aplicação de regulador (Gráfico 10) para todas as subdoses de herbicida avaliadas, correspondendo a 8,39%, 6,53%, 9,47%, e 8,70% de redução, respectivamente, e conforme Wang e colaboradores (2014) observaram, esse efeito foi devido à ação inibidora ao metabolismo da giberelina provocada pela aplicação de cloreto de mepiquat que, por sua vez, interfere no alongamento celular, levando a uma redução na altura da planta, atuando de forma complementar aos hormônios auxinas e citocininas.

Entretanto, ao desdobrar para cada subdose, foi verificado que sem aplicação de regulador de crescimento, a aplicação de subdoses de 2,4-D até 1,78 g e.a. ha⁻¹ promoveu o crescimento das plantas até 174,28 cm. Assim como pode ser observado para o tratamento com regulador de crescimento, onde a subdose de 1,68 g e.a. ha⁻¹ promoveu a maior estatura de plantas, confirmando efeito hormético das subdoses sobre a altura de plantas algodão.

Gráfico 10 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a variável altura de plantas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

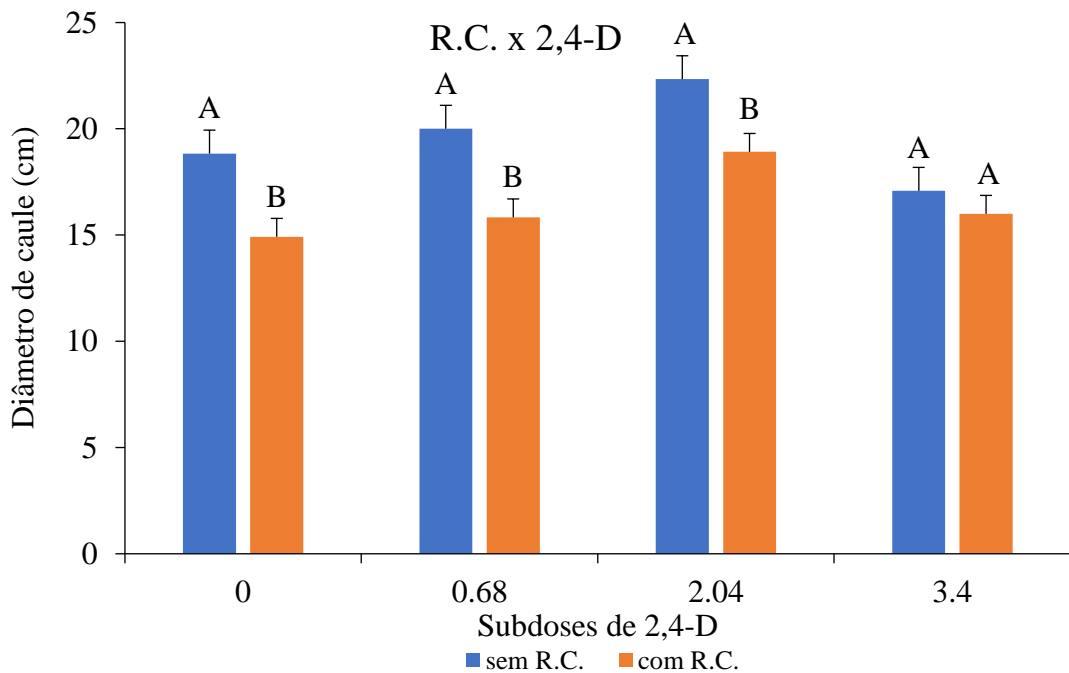
Nota: letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento em função de subdoses de 2,4-D, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 4$. DMS = 6,752. E.P. $\pm 2,29$. R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida.

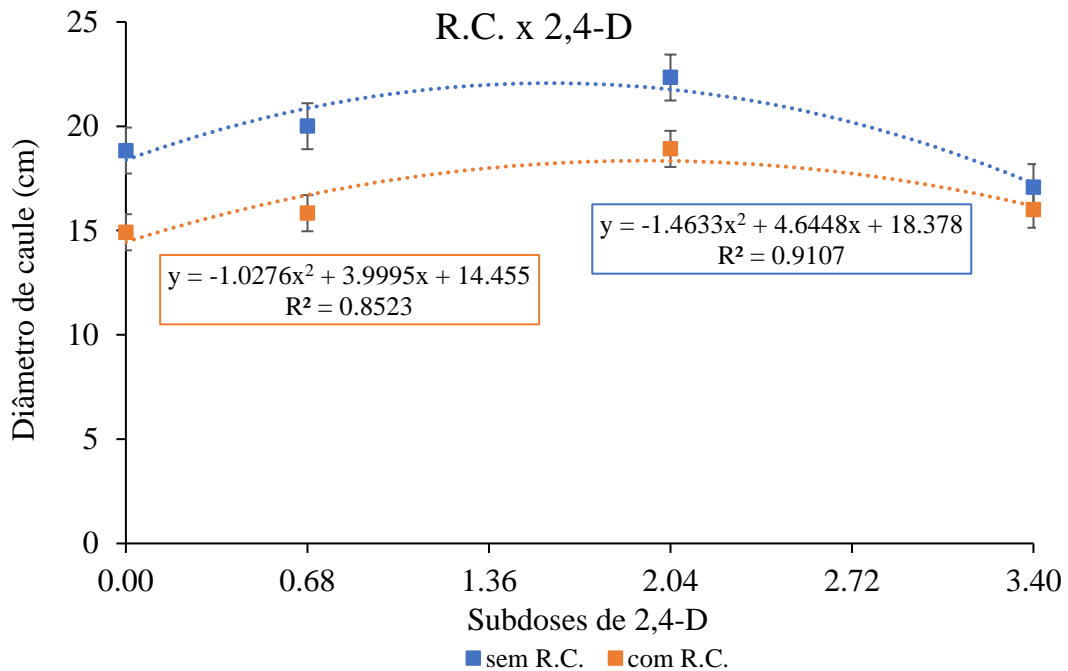
Ao analisar o diâmetro do caule (Gráfico 11) verificou-se que a aplicação de regulador de crescimento resultou em plantas com menor diâmetro, excetuando-se o tratamento com a maior subdose de 2,4-D. A diferença de redução em relação às

plantas não tratadas com regulador de crescimento foi de 20,81%, 20,85% e 15,31%, respectivamente. Esse resultado, assim como foi observado para altura de plantas está de acordo com o esperado pois são parâmetros de crescimento interligados. A pesquisa conduzida por Azevedo e colaboradores (2004) constatou resultados semelhantes em plantas de algodão quando submetidas a uma única aplicação de 50 g ha⁻¹ de cloreto de mepiquat. No entanto, os mesmos autores observaram que, com duas aplicações fracionadas de 50 g ha⁻¹, o regulador de crescimento também provocou redução no diâmetro do caule da planta.

No desdobramento da interação, tanto para ausência quanto para presença do regulador de crescimento (Gráfico 11), verificou-se que o aumento da subdose de 2,4-D até 1,59 e 1,95 g e.a. ha⁻¹ resultou em plantas com maior diâmetro (22,06 e 18,35 cm), assim como observado anteriormente para altura de plantas, sendo que a partir deste ponto, o aumento da subdose exerceu efeito negativo reduzindo o diâmetro do caule em plantas de algodão ao ponto de estarem semelhantes àquelas tratadas com regulador de crescimento.

Gráfico 11 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a variável diâmetro do caule.



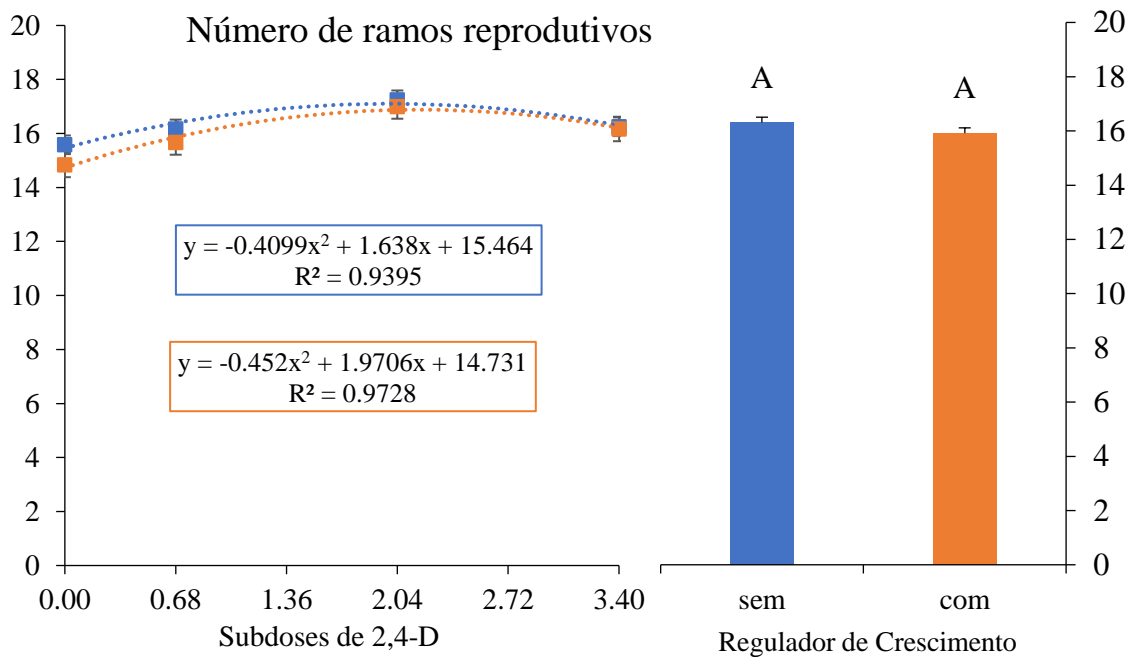


Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento em função de subdoses de 2,4-D, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 4$. DMS = 2,01. E.P. $\pm 0,68$. R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida.

Para o número de ramos reprodutivos, a aplicação de regulador de crescimento não apresentou diferenças significativas (Tabela 3 e Gráfico 12), entretanto, a aplicação da subdose de 2,04 g e.a. ha⁻¹ proporcionou o maior número de ramos reprodutivos, sendo um efeito positivo pois, com maior número de ramos reprodutivos a planta tem mais chances de emitir flores e conseqüentemente mais capulhos. Os achados referentes à utilização do regulador de crescimento estão alinhados com as pesquisas de Américo, Américo-Pinheiro e Furlani Junior (2009), os quais também não observaram efeito significativo na diminuição de ramos reprodutivos ao utilizar cloreto de mepiquat. No entanto, destacou-se a discrepância em relação à aplicação de subdoses de 2,4-D, em que não foram identificadas divergências para as doses avaliadas.

Gráfico 12 – Análise das subdoses de 2,4-D (esquerda) e aplicação de regulador de crescimento (direita) sobre o número de ramos reprodutivos do algodoeiro.

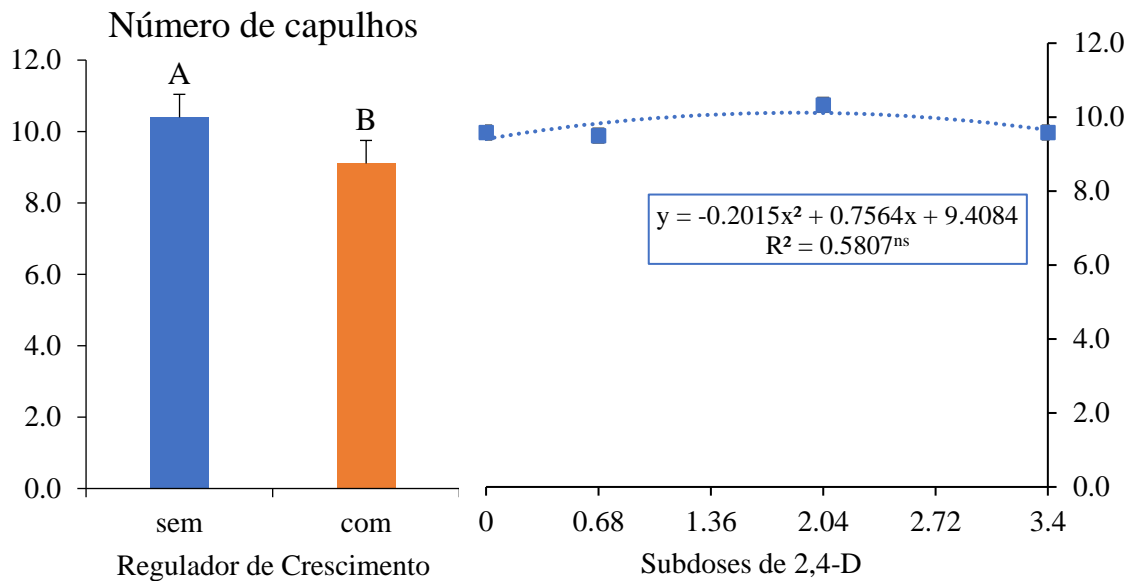


Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: Análise de regressão do número de nós reprodutivos em função das subdoses de 2,4-D, à $p < 0,05$. $n = 4$. DMS = 0,824. E.P. $\pm 0,28$. R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida.

Para o número médio de capulhos por planta (Gráfico 13), a interação não apresentou significância de acordo com o teste F. De mesmo modo, não foram observadas diferenças significativas na quantidade de capulhos para as subdoses do herbicida testadas, entretanto, notou-se menor número nos tratamentos com regulador de crescimento (9,10) em relação as plantas não tratadas (10,40) diferindo estatisticamente, podendo ser em decorrência da menor altura das plantas e conseqüentemente menor comprimento do ramo reprodutivo que se deve à fenologia em espiral do algodão. Associada a esse fato, a planta ao invés de investir na quantidade de frutos prezou pelo enchimento desses, o que pode ser observado nos gráficos de produtividade, resultando em frutos mais pesados.

Gráfico 13 – Análise das médias do tratamento Regulador de crescimento para o número médio de capulhos por planta de algodão.



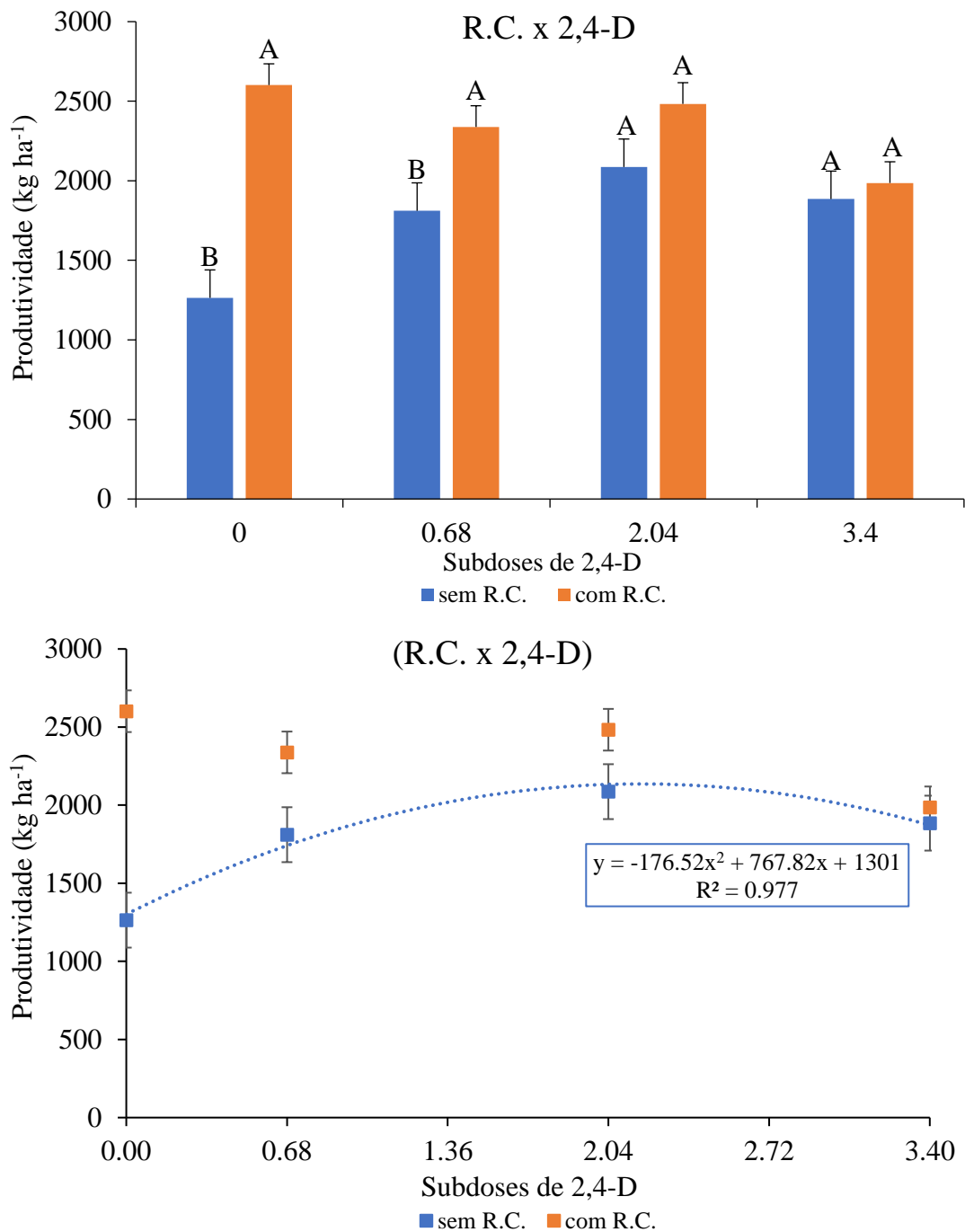
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: Análise do número de capulhos sob aplicação de regulador de crescimento em função de subdoses de 2,4-D, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 4$. DMS = 0,995. E.P. $\pm 0,34$.

A produtividade apresentou interação significativa pelo teste F ($p < 0,05$) e, verificou-se que a aplicação de regulador de crescimento associada às menores subdoses tiveram efeito positivo sobre a produção de algodão em caroço, resultando em plantas mais produtivas (Gráfico 14). Esse incremento de produção foi correspondente à 527 kg ha^{-1} para a dose de $0,68 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ em relação aos tratamentos sem aplicação de regulador de crescimento. O efeito fisiológico do regulador de crescimento é alternar a energia que seria utilizada para o crescimento apical e desviá-la para a produção, favorecendo o enchimento das maçãs e consequentemente, aumentando sua densidade.

Para as maiores subdoses não foram observadas diferenças significativas na produção em função da aplicação de regulador de crescimento porém, ao avaliar o desdobramento da interação para as subdoses (Gráfico 14), verificou-se que não houve diferenças significativas na produtividade com a aplicação de regulador de crescimento, porém, nos tratamentos onde não foi aplicado regulador, as plantas tenderam a produzir mais conforme aumentou-se as subdoses até $2,16 \text{ g e.a. ha}^{-1}$, o que correspondeu à $2135,92 \text{ kg ha}^{-1}$ de algodão em caroço.

Gráfico 14 – Desdobramento da interação entre regulador de crescimento e subdoses de 2,4-D para a produtividade de algodão em caroço.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: letras maiúsculas diferem os tratamentos sob aplicação de regulador de crescimento em função de subdoses de 2,4-D, pelo teste de Tukey à $p < 0,05$. $n = 4$. DMS = 482,16. E.P \pm 163,94. R.C.: regulador de crescimento; 2,4-D: subdoses de herbicida.

Um resultado similar para a produtividade foi encontrado por Americo; Americo-Pinheiro; Furlani Junior (2017) onde a produtividade de algodão em caroço aumentou

com as crescentes subdoses de 2,4-D até 1,75 g e.a. ha⁻¹, resultando numa produtividade de algodão em caroço de 2.021,15 hg ha⁻¹.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão experimento 1

As maiores subdoses com 3,40 g e.a. ha⁻¹ de 2,4-D aplicadas via foliar resultaram em menor índice SPAD, reduzindo também a fotossíntese, transpiração e condutância estomática. Em baixa concentração, o 2,4-D proporcionou maior desenvolvimento da parte aérea em plantas tratadas com regulador de crescimento submetidas à menor disponibilidade de água, além de aumentar a concentração de açúcares solúveis e compostos nitrogenados nas folhas do algodoeiro.

5.2 Conclusão experimento 2

A aplicação do regulador de crescimento reduziu a estatura das plantas de algodão, o diâmetro de caule e conseqüentemente o número de capulhos por planta, entretanto, aumentou significativamente a produtividade de algodão em caroço quando associado às menores subdoses de 2,4-D.

As subdoses de 2,4-D aplicadas até 2,04 g e.a. ha⁻¹, favoreceram o desenvolvimento da planta em altura, diâmetro do caule, aumentou o número de ramos reprodutivos e conseqüentemente, promoveu incremento na produtividade de algodão em caroço.

REFERÊNCIAS

- AGATHOKLEOUS, E. *et al.* Hormesis induced by silver iodide, hydrocarbons, microplastics, pesticides, and pharmaceuticals: Implications for agroforestry ecosystems health. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 820, p. 153116, 2022.
- AGATHOKLEOUS, E.; Calabrese, E. J.; Barceló, D. Environmental hormesis: New developments. **The Science of the total environment**, Amsterdam, v. 906, p. 167450, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167450>
- AGUILAR, J. V. **Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro tratado com subdose hormética de 2,4-D em função da aplicação de níquel e nitrogênio.** Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção), Ilha Solteira – SP, 41 f., 2017.
- AMERICO, G. H. P.; Americo-Pinheiro, J. H. P.; Furlani Junior, E. Hormesis effect of dichlorophenoxy acetic acid sub-doses and mepiquat chloride on cotton plant. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 35, p. e017166065, 2017.
- ASSOCIAÇÃO MATO-GROSSENSE DOS PRODUTORES DE ALGODÃO – AMPA. **História do algodão.** Cuiabá: AMPA, 2024. Disponível em: <https://ampa.com.br/historia-do-algodao/>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- BEEGUM, S. *et al.* Development of a cotton fiber quality simulation module and its incorporation into cotton crop growth and development model: GOSSYM. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 212, p. 108080, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108080>
- BENDER, E. P. *et al.* Modelagem dos crescimento e produtividade do algodão em cultivo comercial no cerrado baiano. **Nativa**, v. 8, n. 3, p. 403-412, 2020.
- BIELESKI, R. L.; Turner, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 17, p. 278-293, 1966. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(66\)90206-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(66)90206-5).
- BRASIL. **Relatório de comercialização de agrotóxicos.** Boletim. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 25 de julho de 2024.
- CALABRESE, E. J. *et al.* Taurine induces hormesis in multiple biological models: May have transformative implications for overall societal health. **Chemico-Biological Interactions**, Shannon, p. 110930, 2024.
- CALABRESE, E. J.; Agathokleous, E. Nitric oxide, hormesis and plant biology. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 866, p. 161299, 2023.

- CALABRESE, E. J.; Agathokleous, E. Smoke-water commonly induces hormetic dose responses in plants. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 765, p. 142776, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142776>
- CALABRESE, E. J.; Blain, R. B. Hormesis and plant biology. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 157, n. 1, p. 42-48, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.028>
- CAMPBELL, J. B.; López-Martínez, G. Anoxia elicits the strongest stimulatory protective response in insect low-oxygen hormesis. **Current Opinion in Toxicology**, Amsterdam, v. 29, p. 51-56, 2022.
- CATALDO, D. A.; Maroon, M.; Schrader, L. E.; Youngs, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant-tissue by nitration of salicylic-acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 6, p. 71-80, 1975. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>.
- CHALISE, D. P. *et al.* Cultivar, irrigation management, and mepiquat chloride strategy: Effects on cotton growth, maturity, yield, and fiber quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 286, p. 108633, 2022.
- CHEN, H. *et al.* Changes of RNA N6-methyladenosine in the hormesis effect induced by arsenite on human keratinocyte cells. **Toxicology in Vitro**, Oxford, v. 56, p. 84-92, 2019.
- DI MEO, N. L. **Understanding the inheritance and mechanism of auxinic herbicide resistance in wild radish (*Raphanus raphanistrum* L.)**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Ambiental) – Universidade de Guelph, Guelph, Canadá, 2012.
- DUBOIS, M.; Gilles, K. A.; Hamilton, J. K.; Rebers, P. A.; Smith, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, Washington, DC, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- ERMANIS, A. *et al.* Defining physiological contributions to yield loss in response to irrigation in cotton. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 207, n. 2, p. 186-196, 2021.
- EROFEEVA, E. A. Hormesis in plants: Its common occurrence across stresses. **Current Opinion in Toxicology**, Amsterdam, v. 30, p. 100333, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.006>
- FANG, S. *et al.* Foliar and seed application of plant growth regulators affects cotton yield by altering leaf physiology and floral bud carbohydrate accumulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 231, p. 105-114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.012>

FOREIGN AGRICULTURAL SERVICES/UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – FAS/USDA. **Cotton: world markets and trade**. Mar. 2024. 35 p. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/cotton.pdf>. Acesso em 10 abr. 2024.

FURLANI JUNIOR, E. *et al.* Efeito de subdoses de 2, 4-D sobre componente da produção do algodoeiro. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO*, 8.; COTTON EXPO, 1., 2011, São Paulo. **Anais [...]**. Campina Grande, PB: Embrapa Algodão, 2011.

FURLANI JUNIOR, E. *et al.* Modos de aplicação de regulador vegetal no algodoeiro, cultivar IAC-22, em diferentes densidades populacionais e níveis de nitrogênio em cobertura. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 227-233, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000200007>

HAIGLER, C. H. *et al.* Cotton fiber: a powerful single-cell model for cell wall and cellulose research. **Frontiers in plant science**, Lausanne, v. 3, p. 26402, 2012.

HERNANDEZ, F.B.T.; LEMOS FILHO, M.A.F.; Buzetti, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: FEIS/UNESP, 1995. 45 p. (Série Irrigação, 1).

HE, J. *et al.* Prolonged drought affects the interaction of carbon and nitrogen metabolism in root and shoot of cotton. **Environmental and Experimental Botany**, v. 197, p. 104839, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104839>

HILL, Y. *et al.* Adaptation to stressors: Hormesis as a framework for human performance. **New Ideas in Psychology**, Oxford, v. 73, p. 101073, 2024.

ISLAM, F. *et al.* 2, 4-D attenuates salinity-induced toxicity by mediating anatomical changes, antioxidant capacity and cation transporters in the roots of rice cultivars. **Scientific Reports**, London, v. 7, n. 1, p. 10443, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09708-x>

JUAN, V. F. *et al.* Responses of 2, 4-D resistant *Brassica rapa* L. biotype to various 2, 4-D formulations and other auxinic herbicides. **Crop Protection**, Amsterdam, v. 145, p. 105621, 2021.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452 p.

KIM, H. J.; TRIPLETT, B. A. Cotton fiber growth in planta and in vitro. Models for plant cell elongation and cell wall biogenesis. **Plant physiology**, Rockville, v. 127, n. 4, p. 1361-1366, 2001.

KRENCHINSKI, F. H. *et al.* Glyphosate hormesis induced by treatment via seed stimulates the growth and biomass accumulation in soybean seedlings. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 918, p. 170387, 2024.

LAMAS, F. M.; BARCELLOS, A. de O.; BOGIANI, J. C. **Pontos a serem considerados no manejo de regulador de crescimento na cultura do algodoeiro**. [S.l.]: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. 6 p. (Comunicado técnico, 192).

LAMAS, F. M.; FERREIRA, A. C. de B. **Reguladores de crescimento na cultura do algodoeiro**. [S.l.]: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 4 p. (Comunicado técnico, 121).

LEE, J. J. *et al.* Gene expression changes and early events in cotton fibre development. **Annals of botany**, Oxford, v. 100, n. 7, p. 1391-1401, 2007.

MACHADO, R. F. *et al.* Reflexos do mecanismo de ação de herbicidas na qualidade fisiológica de sementes e na atividade enzimática em plântulas de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 28, n. 3, p. 151-160, 2006.

MAGNOLI, K. *et al.* Herbicides based on 2,4-D: its behavior in agricultural environments and microbial biodegradation aspects. A review. **Environmental science and pollution research international**, Heidelberg, v. 27, n. 31, p. 38501–38512, 2020.

MARTINS, I. T. A. *et al.* Quality of cotton fiber and its relationship with meteorological conditions. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 033-051, 2023. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2023.15.2.0082>

MCCULLOUGH, H. The determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. **Clinica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 17, p. 297-304, 1967. [https://doi.org/10.1016/0009-8981\(67\)90133-7](https://doi.org/10.1016/0009-8981(67)90133-7).

MENEZES, I. P. P. **Caracterização in situ e diversidade genética de algodoeiros mocós (*Gossypium hirsutum* raça marie galante) da Região Nordeste do Brasil**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MESHAM, J. H. *et al.* Drought stress tolerance in cotton: progress and perspectives. **Climate Change and Crop Stress**, Dessau-Rosslau, p. 135-169, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816091-6.00005-5>

MO, J. *et al.* Mechanistic insights into hormesis induced by erythromycin in the marine alga *Thalassiosira weissflogii*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Philadelphia, v. 263, p. 115242, 2023.

OLIVEIRA JUNIOR, R. S. Mecanismo de ação dos herbicidas. *In*: OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIM, J.; INOUE, M. H. (Eds). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011, 348 p.

PINCELLI-SOUZA, R. P. *et al.* Hormetic effect of glyphosate persists during the entire growth period and increases sugarcane yield. **Pest management science**, Oxford, v. 76, n. 7, p. 2388-2394, 2020.

QUEIROZ, A. R. S.; VIDAL, R. A. O desenvolvimento de culturas tolerantes ao herbicida diclorofenoxiacetato: revisão de literatura. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 649-654, 2014.

QUEVEDO, Y. M.; MORENO, L. P.; BARRAGAN, E. Predictive models of drought tolerance indices based on physiological, morphological and biochemical markers for the selection of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) varieties. **Journal of Integrative Agriculture**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 1310-1320, 2022. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63596-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63596-1)

RITCHIE, G. L.; BEDNARZ, C. W.; JOST, P. H.; BROWN, S. M. Cotton growth and development. **Cooperative Extension work**, Bulletin 1252, 16 p. Sept., 2004. Disponível em: <https://www.soilcropandmore.info/crops/CottonInformation/B1252/B1252.pdf>. Acesso em 10 abr. 2024.

RIX, R. R.; GUEDES, R. N. C.; CUTLER, G. Christopher. Hormesis dose–response contaminant-induced hormesis in animals. **Current opinion in toxicology**, Amsterdam, v. 30, p. 100336, 2022.

ROSSI, A. C. M. *et al.* Reguladores de crescimento na cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e821997951-e821997951, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7951>

SANTOS, J. C. C. *et al.* Glyphosate hormesis attenuates water deficit stress in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) by modulating physiological and biochemical mediators. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 810, p. 152204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152204>

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

SHEN, J.; Liang, B.; Jin, H. The impact of microplastics on insect physiology and the indication of hormesis. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, p. 117130, 2023.

SOARES, J. J.; BUSOLI, A. C. Efeito dos reguladores de crescimento vegetal nas características agrônômicas do algodoeiro e no controle de insetos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 1, p. 37-41, jan. 1996.

SONG, Y. Insight into the mode of action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as an herbicide. **Journal of integrative plant biology**, Richmond, v. 56, n. 2, p. 106-113, 2014.

SOUSA, D. M. G.; Lobato, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/555355>. Acesso em 10 abr. 2024.

TAHAEI, S. A. *et al.* Plant growth regulators affecting corn (*Zea mays* L.) physiology and rab17 expression under drought conditions. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 41, p. 102288, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102288>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2013.

UL-ALLAH, S. *et al.* Fiber yield and quality in cotton under drought: Effects and management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 255, p. 106994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106994>

VAN RAIJ, B. van *et al.* Chemical analysis for evaluation of fertility of tropical soils. **Agronomic Institute**, Campinas, 2001.

VELMURUGAN, L. *et al.* Determination of fiber yield and quality in cotton cultivars, applied with biologically reclaimed greywater. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 201, p. 116921, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116921>

WANG, L. *et al.* Profiling of MicroRNAs involved in Mepiquat chloride-mediated inhibition of internode elongation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, p. 643213, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.643213>

WANG, L. *et al.* The effect of mepiquat chloride on elongation of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) internode is associated with low concentration of gibberellic acid. **Plant Science**, [s.l.], v. 225, p. 15-23, 2014.

ZHANG, J. *et al.* Hormesis in the heavy metal accumulator plant *Tillandsia ionantha* under Cd exposure: Frequency and function of different biomarkers. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 889, p. 164328, 2023.

ZHANG, Y. *et al.* The metabolic mechanisms of Cd-induced hormesis in photosynthetic microalgae, *Chromochloris zofingiensis*. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 912, p. 168966, 2024.

APÊNDICE A – EXPERIMENTO 1: PLANTAS DE ALGODÃO EM BOA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.



Fonte: elaborado pelos autores.

Nota: Plantas de algodão em boa disponibilidade hídrica tratadas com regulador de crescimento (ausência na esquerda e presença à direita, em pares) e crescentes subdoses de 2,4-D

APÊNDICE B – EXPERIMENTO 1: PLANTAS DE ALGODÃO SOB DEFICIÊNCIA HÍDRICA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: Plantas de algodão sob deficiência hídrica tratadas com regulador de crescimento (ausência na esquerda e presença à direita, em pares) e crescentes subdoses de 2,4-D.

**APÊNDICE C – EXPERIMENTO 2: SEMEADURA DIRETA DO ALGODÃO
SAFRA 2022/23**



Fonte: Elaborado pelos autores.

**APÊNDICE D – EXPERIMENTO 2: ANÁLISE BIOMÉTRICA DE PLANTAS,
COLETA DE PLUMAS PARA QUALIDADE DE FIBRA E DA PRODUTIVIDADE
DE ALGODÃO EM CAROÇO.**



Fonte: Elaborado pelos autores.