

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL JATAÍ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO
CULTIVADO NO CERRADO

Ricardo Fagundes Marques

Engenheiro Agrônomo

JATAÍ - GOIÁS – BRASIL

Abril de 2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

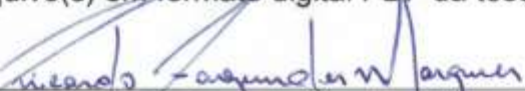
Nome completo do autor: Ricardo Fagundes Marques

Título do trabalho: HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO CULTIVADO NO CERRADO

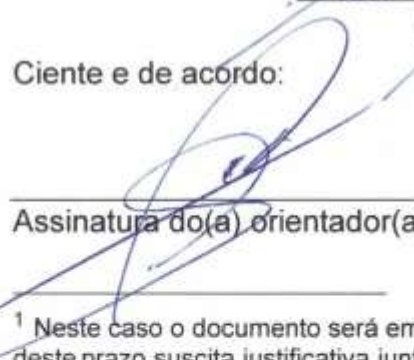
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 09/04/2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL JATAÍ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO
CULTIVADO NO CERRADO

Ricardo Fagundes Marques

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Roberto de Marchi
Coorientador: Prof. Dr. Hildeu Ferreira da Assunção

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

JATAÍ - GOIÁS – BRASIL

Abril de 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Fagundes Marques, Ricardo
HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO
CULTIVADO NO CERRADO [manuscrito] / Ricardo Fagundes
Marques. - 2019.
57 f.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Roberto de Marchi; co-orientador Dr.
Hildeu Ferreira da Assunção.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Ciências Agrárias, Jataí, Programa de Pós
Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, Jataí, 2019.

Bibliografia. Apêndice.
Inclui gráfico, tabelas.

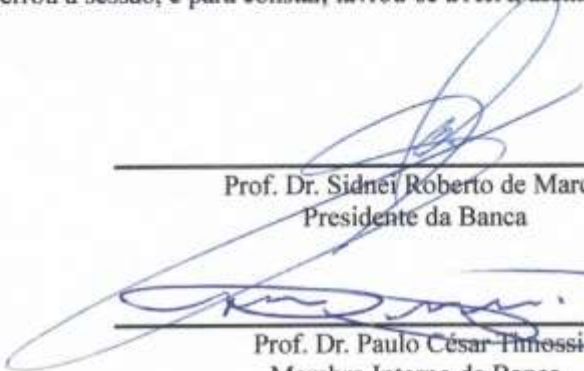
1. Auxina sintética. 2. *Gossypium hirsutum* L.. 3. Efeito hormético.
4. Morfologia. 5. Qualidade da fibra. I. Roberto de Marchi, Sidnei ,
orient. II. Título.

CDU 632




SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL JATAÍ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
PRODUÇÃO VEGETAL

ATA DA REUNIÃO DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE RICARDO FAGUNDES MARQUES. Ao vigésimo segundo dia do mês de março do ano de dois mil e dezenove (22/03/2019), às 08:00 horas, reuniu-se no anfiteatro da Direção da Regional Jataí da UFG, a banca examinadora, composta pelos Professores Doutores: Sidnei Roberto de Marchi (Orientador), Paulo César Timossi (Membro Interno) e Carlos Leandro Rodrigues dos Santos (Membro Externo)-para, sob a presidência do primeiro, procederem na forma da resolução vigente a Defesa de Dissertação” do discente **RICARDO FAGUNDES MARQUES**, do Programa de Pós-graduação em Agronomia, curso de Mestrado, área de concentração em Produção Vegetal. A prova oral versou sobre o tema de sua dissertação com o título: **“HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO CULTIVADO NO CERRADO”**. A sessão foi aberta pelo Presidente da banca examinadora, Prof. Dr. Sidnei Roberto de Marchi, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra a seguir, foi concedida ao autor da dissertação que, entre 30 e 45 minutos procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da Banca arguiu o examinando, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se à avaliação da defesa. Tendo em vista a Resolução nº.1143/2013 do Conselho de Ensino, Pesquisa, Extensão e Cultura (CEPEC), que regulamenta o Programa de Pós-Graduação em Agronomia, a comissão examinadora emitiu seu parecer sobre a defesa realizada pelo discente, considerando-o: **APROVADO** () **REPROVADO** por unanimidade, para fins da obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA pela Universidade Federal de Goiás. Lembrando que o encerramento deste processo avaliativo se dará após a entrega da versão definitiva da dissertação com as devidas correções sugeridas pela banca examinadora, em um prazo máximo de **30 dias**, bem como a entrega do artigo científico ou comprovante de submissão do mesmo em periódico nacional e, ou, internacional. Cumpridas as formalidades de pauta, às 11:10 horas, a Prof. Dr. Sidnei Roberto de Marchi, Presidente da banca examinadora encerrou a sessão, e para constar, lavrou-se a ATA, assinada em duas vias de igual teor.



Prof. Dr. Sidnei Roberto de Marchi
Presidente da Banca

Prof. Dr. Paulo César Timossi
Membro Interno da Banca



Prof. Dr. Carlos Leandro Rodrigues dos Santos
Membro Externo da Banca

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RICARDO FAGUNDES MARQUES – nascido no dia 19 de março de 1994, na cidade de Barra do Garças, estado de Mato Grosso, filho de Clovis Barros Marques e Edma Fagundes Carrijo Marques. Ingressou no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Universitário do Araguaia em março de 2012 sob orientação do Professor Dr. Sidnei Roberto de Marchi, obtendo o título de agrônomo em novembro de 2016. Em março de 2017 ingressou no curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí – GO sob orientação do Professor Dr. Sidnei Roberto de Marchi.

OFEREÇO

À minha família.

Por todo apoio, amor, dedicação e força nos momentos mais difíceis de minha vida.

Dedico

À minha mãe Edma Fagundes Carrijo Marques, ao meu pai Clovis Barros Marques, ao meu irmão Henrique Fagundes Marques, minha cunhada Andressa Caroline Leal Santana e a minha amada namorada Francielly Rodrigues Gomes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, por todas as manhãs acordadas com força para seguir os dias de luta da vida, por todos os obstáculos que consegui superar, por toda a sabedoria e esperança para superar os mesmos.

À minha família, que sempre me iluminou a tomar os caminhos mais retos e menos dolorosos da vida, que sempre me deu força e sempre me ajudou em tudo o que eu precisava, dando o apoio sempre regado com muito amor, e que me fez tornar a pessoa que sou hoje, e sempre me incentivará a me tornar melhor.

À minha namorada por todo apoio em momentos difíceis em minha formação, por todos os conselhos e carinhos em meus momentos de angústia, e por me ajudar e me ensinar a aprender de maneiras mais fáceis e diretas.

A minha família de Jataí, minha tia Andréia, ao Marcos, minha prima Adrianny e ao pequeno Adriel, por todo apoio e carinho em Jataí.

Em especial ao meu orientador e professor Dr. Sidnei Roberto de Marchi, que desde o princípio sempre acreditou em meu potencial e me ensinou as diretrizes para me tornar um profissional melhor. Agradeço por hoje o ter como um grande amigo, por me dar conselhos que levarei por toda a vida comigo. Não é à toa que carinhosamente o chamamos de pai.

Obrigado à equipe hoje conhecida por “Sidnei Corporation”: Anney Marques, Arthur de Oliveira, Beatriz Queiroz, Guilherme Pinheiro, Mauricio Peres, Prissila Araújo e Rodrigo Marques e a todos que de alguma maneira colaboraram para a realização deste trabalho de curso. Mais do que colegas, vocês se tornaram amigos que nunca serão esquecidos.

Ao Professor Dr. Hildeu Ferreira da Assunção, pela coorientação e por todo ensinamento e ajuda durante o mestrado.

A empresa CORTEVA Agriscience pelo apoio técnico e pelo fornecimento das amostras do herbicida utilizado nesse trabalho.

A todo o grupo da fazenda Santa Terezinha, por todo o apoio e carinho aos nos receber, em especial a colega e amiga Sara, por nos aturar e nos ajudar todos os dias, independente se finais de semana ou não.

Aos colegas do PPGA, que como amigos me ensinaram com o dia a dia a como praticar a palavra cativar, sempre com alegria, paz e sempre com muito companheirismo.

Aos componentes da banca examinadora os agradeço por fazerem parte desse momento tão importante em minha vida. Obrigado pelo tempo disponibilizado.

A todos.

Muito obrigado.

Sumário

	Página
RESUMO.....	ix
SUMMARY.....	x
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. REVISÃO DE LITERATURA	2
1.2.1. Algodoeiro.....	2
1.2.2. Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).	5
1.2.3. Hormesis.....	9
1.3. REFERÊNCIAS.....	13
CAPÍTULO 2 – HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ASPECTOS BIOMÉTRICOS DO ALGODOEIRO.....	18
2.1. INTRODUÇÃO	20
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
2.4. CONCLUSÕES	34
2.5. REFERÊNCIAS.....	34
CAPÍTULO 3 – HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ASPECTOS QUALI-QUANTITATIVOS DE ALGODOEIRO CULTIVADO NO CERRADO.....	37
3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	40
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
3.4. CONCLUSÕES	54
3.5. REFERÊNCIAS.....	54
4.0. APÊNDICE	57

HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ALGODOEIRO CULTIVADO NO CERRADO

RESUMO - Algumas substâncias tóxicas em doses elevadas podem ser estimuladoras ou benéficas em doses baixas. Este efeito de baixas doses de uma substância tóxica é conhecido como hormesis. Efeitos horméticos de auxinas sintéticas, como o 2,4-D, podem ser esperados pelo aumento da produção e atividade de auxinas. Com o objetivo de estudar os efeitos de subdoses do herbicida 2,4-D sal colina sobre a morfologia e produtividade do algodoeiro herbáceo não-tolerante ao herbicida cultivado no Cerrado em diferentes estádios fenológicos, conduziu-se dois experimentos, sendo o primeiro em condições de casa de vegetação e o segundo em campo. Os tratamentos para ambos os experimentos foram dispostos por nove frações da dose média de rótulo do herbicida 2,4-D formulação sal colina: 0 (testemunha); 0,4275; 0,855; 1,71; 3,42; 8,55; 17,1; 34,2 e 68,4 g ea ha⁻¹, que foram estabelecidas em função da dose de 1,5 L ha⁻¹ recomendada, a saber: 0; 0,0625%; 0,125%; 0,25%; 0,5%; 1,25%; 2,5%; 5% e 10%. As aplicações das diferentes subdoses do herbicida 2,4-D sal colina foram realizadas quando pelo menos 50% das plantas entraram nos respectivos estádios fenológicos estudados (V4 e B4 em casa de vegetação e V4, B4 e C4 em campo). Os resultados foram submetidos a análise de variância, e quando significativos testou-se o modelo de hormesis com o objetivo de descrever as curvas de dose-resposta com estímulo em baixas doses. Observou-se que subdoses inferiores a 0,25% da dose recomendada do herbicida 2,4-D sal colina podem incrementar as variáveis morfológicas e produtivas do algodoeiro, e que o modelo utilizado foi alterado em função da exposição em diferentes estádios fenológicos. Acrescido a isso foi possível observar que as características da fibra de algodão não são influenciadas pelas subdoses do herbicida, todavia a exposição das subdoses do herbicida nas plantas com diferentes idades pode influenciar as variáveis resistência da fibra, alongamento e grau de amarelamento.

Palavras-chave: auxina sintética, *Gossypium hirsutum* L., efeito hormético, morfologia, qualidade da fibra.

HORMESIS OF 2,4-D CHOLINE SALT IN COTTON CULTIVATED IN BRAZILIAN SAVANNA

SUMMARY - Some toxic substances in high doses can be stimulating or beneficial in low doses. This effect of a low dose of a toxic substance is known as hormesis. The hormetics responses of synthetic auxins, such as 2,4-D, can be expected through increased production and auxin activity. Two experiments were conducted in order to study the doses effects of herbicide 2,4-D choline salt on the morphology and productivity of non-tolerant cotton cultivated in the brasilian Savanna in different phenological stages. The first one being conducted in greenhouse conditions, and the second in the field. Treatments for both experiments were arranged by nine fractions of the mean dose of the herbicide 2,4-D formulation: choline salt: 0 (control); 0.4275; 0.855; 1.71; 3.42; 8.55; 17.1; 34.2 and 68.4 g ae ha⁻¹, which were established as a function of the dose of 1.5 L ha⁻¹ recommended in label: 0; 0.0625%; 0.125%; 0.25%; 0.5%; 1.25%; 2.5%; 5% and 10%. The applications of the different 2,4-D choline salt herbicide doses were performed when at least 50% of the plants entered the respective studied phenological stages. The results were submitted to analysis of variance and, when significant, the hormesis model was tested in order to describe the dose-response curves with low dose stimulation. It was observed that doses lower than 0.25% recommended dose of the 2,4-D choline salt herbicide may increase the morphological and productive variables of the cotton, and that the model used was altered as a function of exposure in different phenological stages. In addition, it was possible to observe that the characteristics of the cotton fiber are not influenced by the herbicide doses, however the exposure of the herbicide doses in plants of different ages may influence the variables fiber strength, elongation and degree of yellowing.

Keywords: synthetic auxin, *Gossypium hirsutum* L., hormetic effect, morphology, productivity, fiber quality.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

A fibra de algodão é a mais cultivada e a mais importante das fibras têxteis do mundo. A retomada de crescimento da área plantada com a cultura no Brasil ocorreu na década de 1990, com significativo aumento das áreas cultivadas na região Centro-Oeste (CONSTANTIN et al., 2007). Porém, devido ao convívio dessa cultura com áreas cultivadas com soja e milho, possíveis contaminações decorrentes da aplicação de herbicidas nas culturas vizinhas tornou-se uma problemática para o cultivo de algodoeiro (BYRD et al., 2016).

O algodoeiro pode ser considerado como uma das culturas mais sensíveis à contaminações de baixas doses do herbicida 2,4-D. Quando absorvido durante estádios reprodutivos, as flores se deformam, as brácteas e as pétalas se apresentam fundidas e por conta disso, não produzem maçãs. Algumas maçãs que conseguem se desenvolver são geralmente deformadas e pequenas, acarretando em baixa produção de pluma (MARPLE et al., 2008).

O 2,4-D é um herbicida pertencente ao grupo das auxinas sintéticas, também conhecidos como mimetizadores de auxinas, que revolucionou o controle de espécies eudicotiledôneas em cereais na década de 1940, sendo o primeiro herbicida seletivo introduzido no mercado com sucesso, usado até a atualidade (RODRIGUES & ALMEIDA, 2011). Mesmo quando aplicado em associação com outros produtos, os problemas de fitotoxicidade na maioria das vezes são atribuídos ao herbicida 2,4-D, detectado principalmente por seus sintomas bastante característicos (MOTA, 2015).

Algumas substâncias, embora tóxicas, podem ser estimulantes ou mesmo benéficas em doses baixas. Este é o caso dos medicamentos que são usados pelos seus efeitos benéficos, bem como com os produtos fitossanitários que são normalmente utilizados como substâncias tóxicas para plantas daninhas, insetos e doenças. Este efeito estimulante de uma baixa dose de uma substância tóxica é conhecido como hormesis (EGAN et al., 2014).

O conceito de hormesis possui muitas implicações controversas, uma vez que é caracterizado pela relação de dose-resposta bifásica, com efeito benéfico em doses baixas e efeito tóxico em altas doses. Exemplos incluem curvas com formato de “U” invertido mostrando intensificação de baixas doses quando reduções são esperadas (MURADO & VASQUEZ, 2010).

Herbicidas à base de auxinas são exemplos bem conhecidos de produtos químicos que aumentam o crescimento em concentrações não tóxicas, mimetizando a auxina, hormônio de crescimento, mas que são letais em doses mais elevadas (AMÉRICO et al., 2017). Estudos com auxinas sintéticas, como o 2,4-D, têm mostrado respostas horméticas em plantas. Portanto, as respostas horméticas em algumas características das plantas poderiam ser esperadas através do aumento da produção e atividade de auxinas (CEDERGREEN et al., 2007).

A aplicação de subdoses de 2,4-D tem sido utilizada com a finalidade de avaliação dos eventuais efeitos na cultura do algodoeiro como por exemplo nos trabalhos de Constantin et al. (2007), Furlani Júnior et al. (2011) e Américo et al. (2016).

Destaca-se que os trabalhos mencionados não utilizaram curvas de dose-resposta para explicar os eventos observados, o que pode comprometer a correta identificação do efeito de hormesis (CEDERGREEN et al., 2005). Além disso, os poucos resultados existentes utilizaram a formulação amina e foram obtidos em cultivos de verão realizados nos estados do Paraná e de São Paulo, condições estas que não representam a atual situação da produção algodoeira no Brasil, as quais estão concentradas nas regiões do bioma Cerrado.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1. Algodoeiro

O gênero *Gossypium* inclui 49 espécies conhecidas, mas esse número pode ser subestimado, devido à falta de informações, principalmente das espécies que ocorrem nos continentes Africano e Asiático (ECHER et al., 2014). Dentre essas espécies quatro se destacam devido suas características de importância econômica,

sendo *G. hirsutum* L., *G. barbadense* L., *G. herbaceum* L. e *G. arboreum* as mais cultivadas no mundo (GADELHA et al., 2014).

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.), pertencente à família Malvaceae, é uma espécie cuja origem está localizada nas Américas do Sul e Central, havendo indícios que possa ter surgido há pelo menos 12,5 milhões de anos (MICHELOTTO et al., 2015; WENDEL et al., 2010).

A espécie *G. hirsutum* é uma planta caracterizada por possuir entre 0,6 a 2 metros de altura, pouco ramificadas, com folhas largas tri ou pentalobadas. Suas flores apresentam cores amarelo pálido, com média de 11 sementes por lóculo. Suas fibras são longas e há presença de línter no tegumento das sementes (BORÉM & FREIRE, 2014).

As plantas de algodoeiro possuem hábito de crescimento indeterminado e porte subarborescente. Têm caule ascendente e raízes pivotantes que podem chegar a 2,50 m de profundidade. Seu fruto é denominado de maçã, e cada uma possui de três a cinco lóculos, sendo que o fruto aberto expõe suas fibras, denominando-se capulho. Por toda a planta glândulas denominadas gossipol apresentam-se distribuídas, sendo tóxicas e protegendo a planta de herbivoria (BORÉM & FREIRE, 2014).

Apresentando metabolismo fotossintético do tipo C3, com elevada taxa de fotorrespiração, dependendo de fatores ambientais como luminosidade e temperatura, o algodoeiro apresenta alta complexidade morfológica e fisiológica (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Devido essa alta complexidade fisiológica diversos fatores podem influenciar a quantidade e qualidade de fibra de algodão produzida. A manipulação de fatores presentes no ciclo do algodoeiro serve de ferramentas para obtenção de produtividades ótimas. No entanto, nem sempre é possível obter bons resultados devido à grande interferência do meio na dinâmica metabólica da planta (AGUILAR, 2017).

A fibra de algodão é a mais importante das fibras têxteis mundial, quer pelo valor monetário da produção, a multiplicidade de produtos que dele se origina e o conforto que proporcionam. O algodoeiro é uma planta de aproveitamento completo, sendo que existe uma variada gama de produtos de utilização universal oriundos da fibra produzida, do caroço e as folhas são consideradas medicinais, sendo cultivada por mais de 60 países no mundo (BALLAMINUT, 2009).

Essa importância econômica mundial se deve ao fato do algodoeiro ser responsável por movimentar diversos setores da economia, como a indústria têxtil, agroindústrias, grandes e pequenos agricultores, inclusive a agricultura familiar. Além disso, há um grande aproveitamento da produção do algodoeiro, visto que, existem subprodutos derivados da indústria, como a torta de algodão, que pode ser uma fonte complementar na ração de ruminantes, pois o caroço de algodão tem alto valor nutricional (25% proteínas e lipídeos, aproximadamente) (CHITARRA, 2014; COSTA et al., 2011).

O cultivo do algodoeiro adaptou-se muito bem nas situações brasileiras devido, principalmente, condições edafoclimáticas favoráveis ao seu desenvolvimento, aliado a incentivos fiscais e pelo melhoramento genético, que possibilitou adaptar a cultura a diversas regiões, mantendo boa produtividade (FRANCISCO & CAMARA, 2013). O seu cultivo é considerado uma atividade agrícola de grande importância socioeconômica para o Brasil, tanto pela ocupação de mão-de-obra quanto na produção de manufaturados responsáveis pela geração de divisas para o país (SOBRINHO et al., 2007).

Entre os anos de 1960 e 1980 o Brasil encontrava-se entre os maiores produtores e exportadores mundiais de algodão. Entretanto, com a chegada da principal praga do algodoeiro, o bicudo (*Anthonomus grandis*), muitas plantações foram dizimadas e o Brasil passou de país autossuficiente para grande importador (HAGUENAUER et al., 2002).

O algodão então surgiu como alternativa de rotação com a soja, contudo era preciso alcançar melhores níveis de produtividade. Investimentos em qualidade e pesquisas fizeram com que o setor crescesse. A ampliação do mercado de exportação fez com que o país, em menos de oito anos, deixasse de ser o segundo maior importador para integrar a lista dos maiores exportadores (MARQUES, 2013).

Na década de 90, a cotonicultura no Brasil encontrava-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Após esse período, houve um aumento na produção de algodão na região Centro-Oeste. Este fato foi resultante das condições favoráveis para o desenvolvimento da cultura e da utilização de cultivares adaptadas, com arquitetura de planta adequada à colheita mecanizada, alta produtividade tanto em caroço quanto em fibra, alta adaptação às condições edafoclimáticas do Cerrado, aliado às modernas técnicas de cultivo (FARIAS, 2005).

Com essa expansão das áreas algodoeiras para o Centro-Oeste brasileiro, o convívio dessa cultura com áreas já cultivadas com outras culturas como soja e milho, tornou-se um problema, pois é importante que se entenda a suscetibilidade do algodoeiro a possíveis contaminações decorrentes da aplicação de herbicidas nas lavouras vizinhas, como resíduo em tanque de pulverização e deriva (CONSTANTIN et al., 2007).

Como notificado desde a descoberta do 2,4-D, o algodoeiro é extremamente sensível a este herbicida, uma vez que perdas entre 32% e 71% de produtividade podem ser esperadas quando derivas ou erros de aplicação atingem as plantas no estágio vegetativo ou no início do florescimento. Entretanto, a sensibilidade declina para aproximadamente 6,0% nos estádios após a formação das maçãs (EGAN et al., 2014).

1.2.2. Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

Considerado um dos herbicidas mais utilizados no mundo nos últimos 70 anos, o sucesso do ácido 2,4-diclorofenoxiacético, mais conhecido como 2,4-D, se deve principalmente à sua alta eficácia, baixo custo, seletividade em gramíneas e por ser uma opção para o controle de plantas resistentes a outros herbicidas como o glyphosate, além de ser uma ferramenta chave para aplicações de dessecação em campos sob sistemas de semeadura direta (FOLONI, 2016).

Outra característica desejável deste herbicida é que suas formulações comerciais são facilmente solúveis em água, óleo e outros solventes resultando em rápida penetração através das folhas e raízes, o que o torna um herbicida mais eficaz. Baixas concentrações também regulam o crescimento das plantas e atua como um mimetizador do hormônio auxina, promovendo divisão e alongamento celular (ISLAM et al., 2017).

A princípio, o 2,4-D foi desenvolvido para ser utilizado junto com o ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético (2,4,5-T) e o pentaclorofenol (PCF) formando o "agente laranja", que foi utilizado como desfolhante pela força aérea norte-americana na guerra do Vietnã (ISLAM et al., 2018).

A "descoberta" do 2,4-D parece ter ocorrido através de uma série de experiências múltiplas e independentes por pesquisadores britânicos e americanos.

Por conta de os estudos estarem sob o controle dos militares, publicações precoces e patentes relacionadas aos ácidos clorofenoxiacéticos nem sempre refletiam a sequência real de eventos. Embora possa ser debatido a respeito de onde reside o crédito para tal descoberta, a comercialização do 2,4-D como herbicida revolucionou o controle de plantas daninhas (PETERSON et al., 2016).

Conhecido como regulador de crescimento, auxina sintética ou herbicida hormonal, o 2,4-D faz parte da classe dos herbicidas mimetizadores de auxina, pois, em baixas concentrações, promove efeitos fisiológicos e bioquímicos similares aos do ácido indol-3-acético (AIA), principal auxina natural presente nas plantas (VANNESTE & FRIML, 2009).

Os herbicidas desse grupo interferem na divisão e alongação celular, em virtude do desbalanço hormonal que promovem nas células, com o aumento da biossíntese de etileno, giberelinas, citocininas, e ácido abscísico (ABA). Esta interferência leva a um crescimento desordenado do tecido vegetal que retorna as atividades meristemáticas com inibição da divisão celular em meristemas primários (OLIVEIRA et al., 2011).

Por conta de todas as auxinas serem ácidos fracos, a fórmula molecular e a habilidade de penetrar na membrana plasmática está relacionada e é dependente do pH. Em plantas, o pH apoplástico é aproximadamente 5,5. Nesse pH, o equilíbrio das moléculas de auxina é calculado para ser aproximadamente 83% dissociado e 17% não dissociado (ou próton-associado). Nesse caso, a carga negativa do grupo carboxílico dissociado da molécula irá impedi-lo de atravessar a membrana sendo que apenas as moléculas não dissociadas poderão atravessar a membrana plasmática por difusão passiva, sem a necessidade da assistência de proteínas transportadoras (ZAŽÍMALOVÁ et al., 2010).

Ainda de acordo com Zažímalová et al. (2010), o citoplasma das células vegetais, por sua vez, apresenta um pH próximo de 7, fazendo com que o equilíbrio das moléculas de auxina se desloque quase que inteiramente a formas dissociadas ou aniônicas. Como as auxinas aniônicas não conseguem se difundir através da membrana plasmática, as mesmas ficam aprisionadas dentro das células.

Por conta disso quando translocado para os meristemas da planta, doses altas de 2,4-D podem atuar de três maneiras: alterando a plasticidade das paredes celulares, influenciando a quantidade de produção de proteínas e aumentando a produção de etileno e ABA (SONG, 2014).

A morte da maioria dos tecidos vegetais tratados com 2,4-D é causada pelo acúmulo de ABA e etileno, causando estresse oxidativo induzido pela alta produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). Esse fenômeno tem sido descrito como um efeito da superconcentração de auxina, conduzindo ao desequilíbrio na homeostase da mesma e nas interações com demais hormônios (GROSSMANN, 2010).

As EROs são produzidas por NADPH oxidases na membrana plasmática, que são ativadas por proteínas conhecidas como RAC / ROP (JONES et al., 2007). Yu et al. (2012), encontraram uma conexão entre as respostas da auxina e do ABA, onde uma proteína fosfatase presente na via de sinalização do ABA se liga à proteína ROP. Essa ligação inibe a proteína quinase SNF1 que mede a produção de EROs relacionada às respostas do ABA (fechamento estomático, inibição do crescimento celular e morte celular).

A ação inicial do 2,4-D envolve o metabolismo dos ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Isso ocorre por conta da acidificação da parede celular por meio do estímulo da atividade da bomba de prótons da ATPase, ligada a membrana celular. A redução no pH apoplástico induz a alongação celular, promovendo o aumento da atividade de enzimas responsáveis pelo afrouxamento das células (FOLONI, 2016).

Por alterar a plasticidade das paredes das células, a ação do 2,4-D sobre as estruturas do citoesqueleto de actina leva à epinastia de órgãos da planta além da alteração da mobilidade dos peroxissomos e mitocôndrias em ambientes celulares. Como essas organelas se movem ao longo do citoesqueleto os distúrbios da actina provavelmente afetam o metabolismo do peroxissoma e da mitocôndria, pois compartilham muitos metabólitos entre si e com os cloroplastos. Por conta de os peroxissomos serem organelas antioxidantes, sua função mais importante é remover as EROs de diferentes partes da célula (RODRÍGUEZ-SERRANO et al., 2014).

Considerando o efeito de herbicidas auxínicos na redução do empacotamento e polimerização de actina, a defesa antioxidante dos peroxissomos passa a ter uma funcionalidade diminuída. Assim, a célula entra em um estado de estresse oxidativo grave devido à limitação dos peroxissomos e da função mitocondrial (CHRISTOFFOLETI et al., 2015).

Em plantas sensíveis, após aplicações de 2,4-D, constataram-se aumentos significativos da enzima celulase, especialmente da carboximetilcelulase (CMC), principalmente nas raízes. Devido a esses efeitos também ocorrerá epinastia das

folhas, retorcimento do caule, engrossamento das gemas terminais, destruição do sistema radicular e morte da planta. Distúrbios no metabolismo dos ácidos nucleicos, aumento da atividade enzimática e destruição do floema, provocando alongamento, turgescência e rompimento das células também são sintomas característicos da ação desse herbicida (MACHADO et al., 2006).

As plantas eudicotiledôneas danificadas podem ainda apresentar crescimento caracterizado por folhas malformadas, caules ou pecíolos de folhas engrossados, retorcidos além de frutos sem sementes e mal desenvolvidos. Como as moléculas de herbicidas se movem com os açúcares para os sítios das plantas onde são necessários, a inibição do crescimento dos tecidos jovens são os primeiros sintomas da ação do 2,4-D a serem observados (FOLONI, 2016).

Legalmente no Brasil, o ingrediente ativo 2,4-D ($C_8H_6Cl_2O_3$) tem registro para aplicações em pós-emergência das plantas daninhas das culturas do arroz, aveia, cana-de-açúcar, centeio, cevada, milho, sorgo, trigo, pastagens, soja (pré-plantio) e café (AGROFIT, 2018). Existem dois tipos básicos de formulações, que são os sais de amina e ésteres, que obtiveram ampla aceitação no mercado mundial (CONTIERO et al., 2016) e um terceiro, o 2,4-D sal colina que foi desenvolvido recentemente e está em fase final de testes (SKELTON et al., 2017).

A reação do ácido 2,4-D com um álcool forma um éster. Por conta de os principais ésteres comercializados serem feitos a partir de álcoois com uma cadeia alquílica de quatro ou menos carbonos essas formulações são consideradas altamente voláteis. Porém ésteres são facilmente solúveis em óleos, mas são insolúveis em água. Com isso uma vez aplicadas, as formulações de ésteres penetram rapidamente na superfície da folha (cutícula) e são convertidas no ácido (PETERSON et al., 2016). No Brasil, as formulações ésteres não são mais comercializadas desde 2002, possivelmente em função de seus problemas de volatilização (FOLONI, 2016).

As aminas, por sua vez, são as mais utilizadas no mundo, e dentre essas, as mais comuns são as dimetilaminas (CONTIERO et al., 2016). As formulações aminas são mais solúveis em água e requerem horas para atravessar a cutícula. Por esse fato, são menos resistentes as possíveis lavagens após a aplicação, além de serem suscetíveis à formação de precipitados, se aplicadas com água com elevados teores de cátions (FOLONI, 2016). Apesar das melhorias com relação à volatilização, ainda

há dúvidas sobre o risco ambiental dessa formulação, devido ao uso extensivo e muitas vezes inadequado do princípio ativo (MARCINKOWSKA et al., 2017).

Além dessas duas formulações, há uma terceira desenvolvida recentemente, a formulação colina, um sal de amônia quaternária que possui como diferencial o maior potencial na redução do percentual de gotas mais finas, volatilidade e odor, quando comparada as demais formulações (EYTCHESON et al., 2012; SOSNOSKIE et al., 2015).

O 2,4-D sal colina fornece um potencial reduzido de movimento fora do alvo de partículas físicas, diminuindo significativamente a porcentagem do volume de pulverização com gotas finas. Além de reduzir o potencial de deriva da pulverização em condições de laboratório, a formulação de colina de 2,4-D é menos volátil do que as formulações de éster e amina (MANUCHEHRI et al., 2017). No Brasil, os produtos comerciais à base de 2,4-D sal colina estão em seu processo final de registro (CONTIERO et al., 2016).

A grande preocupação quanto ao uso de 2,4-D está relacionada as dúvidas que surgem em relação ao seu risco ao meio ambiente, apesar de ser amplamente utilizado na agricultura (SOUZA et al., 2012). Mesmo quando aplicado em associação com outros produtos, os problemas de fitotoxicidade na maioria das vezes estão ligados ao herbicida 2,4-D, que é detectado principalmente por seus sintomas característicos (COSTA et al., 2012).

O modo de ação depende da dose do 2,4-D que pode provocar diferentes efeitos em espécies sensíveis, e isso marca a diferença entre sua ação como promotor de crescimento ou como herbicida. Assim, em baixas concentrações, o 2,4-D estimula o crescimento e os processos de desenvolvimento, mas em altas concentrações perturba o crescimento normal e provoca danos letais na planta (GROSSMANN, 2010). Este efeito estimulador de doses baixas de substâncias tóxicas é conhecido como hormesis.

1.2.3. Hormesis

O conceito histórico de hormesis está diretamente ligado ao pesquisador conhecido como Paracelsus (1493 - 1541), que é muitas vezes parafraseado por ter dito que “O veneno está na dose”, considerando assim uma segurança aparente de

doses baixas de substâncias tóxicas. Embora o fenômeno tenha sido reconhecido muito antes, o termo hormesis foi usado pela primeira vez por Southam e Erlich (1942), para descrever o efeito bifásico de um composto de casca de carvalho no crescimento de um fungo (BELZ & DUKE, 2014).

Com denominação originária da língua inglesa, o termo hormesis, que vem do grego “hormo” que significa “excitar”, tem origem toxicológica cuja resposta à exposição a certo agente considerado tóxico é bifásica, ou seja, possui dois ramos gráficos com diferentes comportamentos, com estímulo ou efeito benéfico em doses baixas e em altas doses inibição ou efeito tóxico (MATTSON, 2008; MURADO & VASQUEZ, 2010).

Por conta disso, a curva de hormesis é de tal forma que a variável dependente tem mudanças em mais de um sentido com as variações na variável independente. Em contrapartida, modelos lineares e limiares apresentam sentido único, com aumento ou redução em todas as doses (MATTSON & CALABRESE, 2009; HOFFMANN, 2009). A hormesis pode ocorrer tanto em plantas quanto em animais, em todos os níveis biológicos e pode variar dependendo do organismo, do agente estressor e do mecanismo (KIM et al., 2018).

A hormesis deve ser considerada uma resposta adaptativa caracterizada pela perturbação inicial do estado de homeostase (CALABRESE & MATTSON, 2017). A homeostase é definida como a subsistência constante do estado interno de um organismo com funções e desempenhos eficientes de forma a assegurar que um ambiente fisiologicamente estável é mantido diante de uma perturbação (BRITO & HADDAD, 2017).

Quando a homeostase é perturbada, a hormesis representa a vantagem obtida pelo organismo a partir dos recursos inicialmente alocados para as atividades de reparo a dado tecido afetado, mas modestamente em excesso de que precisava para reparar os danos imediatos provocados pela perturbação da homeostase. Esse processo também poderia readaptar o organismo contra os danos de uma exposição posterior mais intensa dentro de um período de tempo limitado, funcionando como uma espécie de vacina (ADEMOWO et al., 2019).

Por conta disso, a resposta pode cumprir funções de reparação e proteção contra subsequentes possíveis exposições mais intensas. Porém, se a exposição posterior não acontece, a alta produção de recursos para reparação pode ser aplicada em outras funções úteis ao organismo (CEDERGREEN et al., 2009).

Desde a introdução de herbicidas sintéticos em meados do século XX, já se sabia de alguns efeitos estimulatórios de subdoses desses produtos no crescimento e/ou fisiologia das plantas, sendo que diversos ingredientes ativos podem ocasionar esses efeitos sendo, atualmente, considerado um fenômeno comum (BELZ, 2018).

Centenas de produtos químicos e até mesmo fatores ambientais podem induzir hormesis em plantas, sendo os herbicidas os mais conhecidos e estudados (AGATHOKLEOUS et al., 2018). A hormesis em plantas é definida por Velini et al. (2008), como sendo o uso de subdoses de herbicidas com a finalidade de estimular o desenvolvimento vegetal.

No caso dos vegetais, a reação para compensar um estresse químico, na maioria das vezes, está relacionada a um maior acúmulo de matéria seca e fresca, tanto da parte aérea quanto radicular, maior produção de sementes por planta, além de incrementos no crescimento radicular, florescimento, área foliar e maior teor de proteínas (BRITO et al., 2018).

É de fundamental importância o conhecimento de doses que possam provocar tais efeitos em grandes culturas, visto que essa técnica pode trazer incrementos significativos em parâmetros importantes de uma cadeia produtiva (SILVA et al., 2012).

Estudos sobre a eficácia de herbicidas geralmente consideram taxas próximas à dose comercial. No entanto, sabe-se que o efeito hormético pode ocorrer em taxas muito baixas. Assim, para estudar a hormesis provocada pelos herbicidas, é necessário considerar amplos intervalos de doses, até 100 vezes mais baixos do que as doses comerciais (BRITO et al., 2018).

Apesar das muitas teorias sobre a causa da hormesis, poucos estudos têm sistematicamente avaliado a sua frequência, magnitude e distribuição entre os diferentes produtos químicos em organismos fotossintéticos em um grande número de curvas de dose-resposta comparáveis (CALABRESE & BLAIN, 2011).

A magnitude das respostas estimulatórias na variável analisada observada em todos os campos da ciência, com diferentes substâncias tóxicas, organismos e intervalos de aplicação, está em média, entre 30 e 60% acima do tratamento controle (CALABRESE, 2010).

Duke et al. (2006) descreveram que em mais de trinta casos de tratamentos de plantas cultivadas com herbicidas em doses subletais, a dose de resposta máxima da hormesis foi de aproximadamente 20% da concentração testada, com resposta em

torno de 50% de incremento da variável analisada. Os estímulos foram verificados em características de crescimento, como ganho de peso, altura, comprimento e área foliar e/ou características internas como teor proteico e níveis de açúcares.

Cedergreen et al. (2005) comentam que informações robustas de hormesis são obtidas por análise de regressão, comparando modelos de regressão não-lineares com e sem a simulação de crescimento hormético e avaliando qual modelo descreve melhor os resultados obtidos. Este procedimento não só confere maior credibilidade aos testes, mas também permite estimar o máximo efeito hormético, a concentração que proporciona tal efeito bem como a faixa de concentração que produz respostas estimulatórias.

Os autores ainda comentam que ensaios de hormesis proporcionada por herbicidas em culturas demonstraram que o efeito pode variar entre poucos até 100% de aumento em uma variável avaliada, embora a média de estimulação seja de 20% a 30% quando comparado com a testemunha. Em relação à dose, a concentração média capaz de induzir a máxima resposta hormética é de aproximadamente 20% da concentração que causa 50% de redução no crescimento.

Alguns compostos químicos, quando utilizados em baixas doses, podem alterar hormônios vegetais. Por exemplo, químicos estimulando a produção de hormônios responsáveis pela alongação foliar e radicular podem iniciar um aumento destes órgãos em baixas doses, enquanto efeitos deletérios podem ser produzidos em altas doses devido ao mesmo mecanismo de ação. Quando examinado em uma ampla variação de dose, pode amalgamar-se a uma curva hormética de dose-resposta (HAYES, 2007).

Herbicidas à base de auxinas são exemplos bem conhecidos de compostos químicos que aumentam o crescimento em concentrações não tóxicas, mimetizando a auxina, hormônio de crescimento, mas que são letais em doses mais elevadas (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Constantin et al. (2007), ao estudarem o efeito de subdoses de 2,4-D amina na suscetibilidade e produtividade do algodoeiro, verificaram que doses iguais ou inferiores a 3,36 g ea ha⁻¹ aplicadas na fase de florescimento não alteraram de forma significativa a produtividade da cultura. Os autores também comentam que a sensibilidade da cultura ao herbicida diminui substancialmente a partir do momento em que as maçãs começam a ser formadas. Também foi verificado que houve redução

significativa na produtividade a partir da dose de 6,72 g ea ha⁻¹, assim como encarquilhamento das folhas mais novas.

Américo et al. (2016), ao avaliarem o crescimento e produtividade dos cultivares FMT 701 e Fibermax 966 em função da aplicação de subdoses de 2,4-D amina, observaram que subdoses entre 0,68 e 3,40 g ea ha⁻¹ aplicadas no estádio B4 proporcionaram incremento no número de estruturas reprodutivas para o cultivar FMT 701. A aplicação de subdoses de 2,4-D na faixa de 1,75 a 1,90 g ea ha⁻¹ propiciou aumento de produtividade de algodão em caroço para a cultivar FMT 701. Para a cultivar Fibermax 966 a subdose de 1,75 g ea ha⁻¹ foi a que possibilitou incremento na produtividade de algodão em caroço.

1.3. REFERÊNCIAS

- ADEMOWO, O. S. et al. Nutritional Hormesis in a Modern Environment. In: **The Science of Hormesis in Health and Longevity**. Academic Press, 2019. p. 75-86.
- AGATHOKLEOUS, E.; KITAO, M.; CALABRESE, E. J. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants. **Environmental Pollution**, 2018.
- AGROFIT, M. D. A. P. E. A. **Sistema de agrotóxicos fitossanitários. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**, 2018. Disponível em: < http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/!ap_ing_ativo_detalhe_cons?p_id_ingrediente_ativo=1> Acesso em: 26 jun. 2017.
- AGUILAR, J.V. **Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro tratado com subdose hormética de 2, 4-D em função da aplicação de níquel e nitrogênio**. 2017. 43 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.
- AMÉRICO, G. H. P. et al. Desenvolvimento e produtividade do algodoeiro em função da aplicação de subdoses de ácido diclorofenoxiacético e cloreto de mepiquat. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 91, n. 2, p. 117-129, 2016.
- AMERICO, G. H. P.; AMERICO-PINHEIRO, J. H. P.; FURLANI JR, E. Hormesis Effect of Dichlorophenoxy Acetic Acid Sub-Doses and Mepiquat Chloride on Cotton Plant. **Planta Daninha**, v. 35, 2017.
- BALLAMINUT, C. E. C. **Seletividade da cultura do algodoeiro aos herbicidas Diuron, Clomazone, Trifloxysulfuron-sodium e Pirythiobac-sodium**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- BELZ, R. G. Herbicide hormesis can act as a driver of resistance evolution in weeds—PSII-target-site resistance in *Chenopodium album* L. as a case study. **Pest management science**, 2018.

- BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Herbicides and plant hormesis. **Pest Management Science**, v. 70, n. 5, p. 698-707, 2014.
- BORÉM, A.; FREIRE, E. C. **Algodão: do plantio a colheita**. Minas Gerais: UFV, 2014.
- BRITO, I.; HADDAD, H. A formulação do conceito de homeostase por Walter Cannon. **Filosofia e História da Biologia**, v. 12, n. 1, p. 99-113, 2017.
- BRITO, I. P. F. S et al. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest management science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018.
- BYRD, S. A. et al. Cotton stage of growth determines sensitivity to 2, 4-D. **Weed technology**, v. 30, n. 3, p. 601-610, 2016.
- CALABRESE, E. J. Hormesis is central to toxicology, pharmacology and risk assessment. **Human and Experimental Toxicology**, v. 29, p. 249–261, 2010.
- CALABRESE, E. J.; BLAIN, R. B. The hormesis database: the occurrence of hormetic dose responses in the toxicological literature. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 61, n. 1, p. 73-81, 2011.
- CALABRESE, E. J.; MATTSON, M. P. How does hormesis impact biology, toxicology, and medicine? **NPJ Aging and Mechanisms of Disease**, v. 3, n. 1, p. 13, 2017.
- CEDERGREEN, N. et al. Chemical stress can increase crop yield. **Field Crops Research**, v. 114, n. 1, p. 54-57, 2009.
- CEDERGREEN, N. et al. The occurrence of hormesis in plants and algae. **Dose-Response**, v.5, p.150-162, 2007.
- CEDERGREEN, N.; RITZ, J. C.; STREIBIG, B. Improved empirical models describing hormesis. **Environment Toxicology Chemical**, v. 24, p. 3166-3172, 2005.
- CHITARRA, L.G. **Identificação e controle das principais doenças do algodoeiro**. 3. ed. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2014.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. Auxinic herbicides, mechanisms of action, and weed resistance: A look into recent plant science advances. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 356-362, 2015.
- CONSTANTIN, J. et al. Efeito de subdoses de 2,4-D na produtividade do algodão e suscetibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 24-29, 2007.
- CONTIERO, R. L. et al. Effects of nozzle types and 2, 4-D formulations on spray deposition. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 51, n. 12, p. 888-893, 2016.
- COSTA, A. G. F. et al. Efeito de pontas e pressões de pulverização na deriva de glyphosate + 2,4-D em condições de campo. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Jaboticabal, v. 11, n.1, p. 62–70, 2012.
- COSTA, Q. P. B. et al. Desempenho e características da carcaça de bovinos alimentados com dietas com caroço de algodão. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 63, n. 3, p. 729-735, 2011.
- DUKE, S. O. et al. Hormesis: is it an important factor in herbicide use and allelopathy. **New York: Outlooks on Pest Management**, v. 17, n. 1, p. 29-33, 2006.

- ECHER, F. R. et al. High night temperatures during the floral bud stage increase the abscission of reproductive structures in cotton. **Journal of agronomy and crop science**, v. 200, n. 3, p. 191-198, 2014.
- EGAN, J. F.; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A meta-analysis on the effects of 2,4-D and dicamba drift on soybean and cotton. **Weed Sciences**, v. 62, p. 193-206, 2014.
- EYTCHESON, A. N. et al. Volatility of GF-2726 as Compared with Other Auxin Herbicides. In: **Orlando, FL: Beltwide Cotton Conference**. 2012.
- FARIAS, F. J. C. **Índice de seleção de cultivares de algodoeiro herbáceo**. 2005. 121 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- FOLONI L. L. **O herbicida 2,4-D: Uma visão geral**. Ribeirão Preto, Brazil: Labcom Total. 1 ed., 2016, 252 p.
- FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S. Desafios atuais para o aumento da Produtividade da Soja. **Informações Agrônomicas**, v. 1, n. 143, p. 11-16, 2013.
- FURLANI JÚNIOR, E. et al. Efeito de subdoses de 2,4-D sobre componentes da produção do algodoeiro. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO**, 8., 2011, São Paulo. Anais...Campina Grande: Embrapa Algodão, p. 599-604, 2011.
- GADELHA, I. C. N. et al. **Gossypol toxicity from cottonseed products**. The Scientific World Journal, London, 2014.
- GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v.66, n.2, p. 113-120, 2010.
- HAGUENAUER, L. et al. Evolução das cadeias produtivas Brasileiras na década de 1990. **Economia**, v. 3, n. 2, p. 357-397, 2002.
- HAYES, D. P. Nutritional hormesis. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 61, 147-159, 2007.
- HOFFMANN, G. R. A perspective on the scientific, philosophical, and policy dimensions of hormesis. **Dose-Response**, v. 7, p. 1-51, 2009.
- 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**, v. 7, n. 1, p. 10443-10466, 2017.
- ISLAM, F. et al. Potential impact of the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment International**, v. 111, p. 332-351, 2018.
- JONES, M. P. A et al. The mode of action of thidiazuron: auxins, indoleamines, and ion channels in the regeneration of *Echinacea purpurea* L. **Plant Cell Reports**, v. 26, n. 9, p. 1481-1490, 2007.
- KIM, S. et al. Evolutionarily adapted hormesis-inducing stressors can be a practical solution to mitigate harmful effects of chronic exposure to low dose chemical mixtures. **Environmental Pollution**, v. 233, p. 725-734, 2018.
- 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**, v. 28, n. 3, p. 151-160, 2006.

MANUCHEHRI, M. R.; DOTRAY, P. A.; KEELING, J. W. Enlist TM Weed Control Systems for Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) Management in Texas High Plains Cotton. **Weed Technology**, v. 31, n. 6, p. 793-798, 2017.

MARCINKOWSKA, K. et al. Efficacy of herbicidal ionic liquids and choline salt based on 2, 4-D. **Crop Protection**, v. 98, p. 85-93, 2017.

MARPLE, M. E.; AL-KHATIB, K; PETERSON, D. E. Cotton injury and yield as affected by simulated drift of 2, 4-D and dicamba. **Weed Technology**, v. 22, n. 4, p. 609-614, 2008.

MARQUES, F. Investimentos no setor fizeram com que o país se tornasse segundo maior exportador mundial de algodão. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Alta Paulista, v. 9, n. 1, p. 105-111, 2013.

MATTSON, M. P.; CALABRESE, E. J. Hormesis: A Revolution in Biology, Toxicology and Medicine. **Humana Press**, v. 1, p. 208, 2009.

MATTSON, Mark P. Hormesis defined. **Ageing research reviews**, v. 7, n. 1, p. 1-7, 2008.

MICHELOTTO, M. D. et al. Germinação de sementes de algodoeiro provenientes de plantas submetidas a diferentes densidades larvais do curuquerê-do-algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 7, n. 4, p. 603-607, 2015.

MOTA, A. A. B. **Espectro de gotas e potencial de deriva de caldas contendo o herbicida 2,4-D amina em misturas em tanque**. 2015. 69f Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

MURADO, M. A.; VÁZQUEZ, J. A. Biphasic toxicodynamic features of some antimicrobial agents on microbial growth: a dynamic mathematical model and its implications on hormesis. **BMC microbiology**, v. 10, n. 1, p. 220, 2010.

OLIVEIRA JR, R. S. Mecanismos de ação de herbicidas – In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. 2011, p. 141-148.

PETERSON, M. A. et al. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6 ed. Londrina: RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. (Eds), 2011. 694p.

RODRIGUEZ-SERRANO, M. et al. 2, 4- Diclorophenoxyacetic acid promote snitrosylation and oxidation of actin affectin cytoskeleton and peroxisomal dynamic. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 17, p. 4783-4793, 2014.

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

SKELTON, J. J. et al. Biokinetic Analysis and Metabolic Fate of 2,4-D in 2,4-D-Resistant Soybean (*Glycine max*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 29, p. 5847-5859, 2017.

SOBRINHO, F. P. C. et al. Crescimento e rendimento do algodoeiro BRS-200 com aplicações de cloreto de mepiquat e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 11, n. 3, p. 284-292, 2007.

- SONG, Y. Insight into the mode of action of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) as an herbicide. **Journal of integrative plant biology**, v. 56, n. 2, p. 106-113, 2014.
- SOSNOSKIE, L. M. et al. Evaluating the volatility of three formulations of 2,4-d when applied in the field. **Weed Technology**, v.29, n. 2, p. 177-184, 2015.
- SOUZA, L. A.; CUNHA, J. P. A. R.; PAVANIN, L. A. Deposição do herbicida 2,4-D amina com diferentes volumes e pontas de pulverização em plantas infestantes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 78–85, 2012.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Auxina: o hormônio de crescimento. In: TAIZ, L.; ZEIGER, L. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**, 3 Edição. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 449-484.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- VANNESTE, S.; FRIML J. Auxin: a trigger for change in plant development. **Cell**, v. 136, p. 1005–1016, 2009.
- VELINI, E. D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pesticide Management Science**, v. 64, p.489–496, 2008.
- WENDEL, J. F.; BRUBAKER, C. L.; SEELANAN, T. The origin and evolution of Gossypium. In: **Physiology of cotton**. Springer, Dordrecht. p. 1-18, 2010.
- YU, F. et al. FERONIA receptor kinase pathway suppresses abscisic acid signaling in Arabidopsis by activating ABI2 phosphatase. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 36, p. 14693-14698, 2012.
- ZAŽÍMALOVÁ, E. et al. Auxin Transporters—Why So Many?. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology**, v. 2, n. 3, 2010.

CAPÍTULO 2 – HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ASPECTOS BIOMÉTRICOS DO ALGODOEIRO

RESUMO - Entre os efeitos que envolvem a presença de subdoses de herbicidas nas plantas existe a hormesis, que se refere a substâncias tóxicas em doses elevadas que podem ser benéficas em doses baixas. Por conta disso, objetivou-se com a realização deste trabalho avaliar os efeitos de subdoses do herbicida 2,4-D sal colina sobre aspectos biométricos do algodoeiro herbáceo em diferentes estádios fenológicos. Foi adotado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com sete repetições e os tratamentos experimentais dispostos por nove frações da dose média de rótulo do herbicida 2,4-D formulação sal colina: 0 (testemunha); 0,4275; 0,855; 1,71; 3,42; 8,55; 17,1; 34,2 e 68,4 g ea ha⁻¹ aplicadas nos estádios fenológicos V4 e B4 do algodoeiro. As plantas foram avaliadas quanto aos parâmetros biométricos. Os resultados foram submetidos a análise de variância, e quando significativos testou-se o modelo de hormesis com o objetivo de descrever as curvas de dose-resposta com estímulo em baixas doses. Com os resultados obtidos afirma-se que as subdoses inferiores a 3,42 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 podem incrementar a variável altura e induzir a maior produção de folhas nas plantas do algodoeiro. Nota-se ainda que, mesmo havendo incremento nessas variáveis, o efeito de hormesis não foi significativo para a produção de matéria seca total. As subdoses 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal colina promoveram hormesis para as variáveis altura, número de folhas, matéria seca da parte aérea e total de plantas do algodoeiro em estágio B4.

Palavras-chave: auxina sintética, *Gossypium hirsutum* L., efeito hormético, morfologia.

CHAPTER 2 - HORMESIS OF 2,4-D CHOLINE SALT IN BIOMETRIC ASPECTS OF COTTON

SUMMARY - Among the effects involving the presence of herbicide sub-doses in plants there is hormesis, which refers to toxic substances in high doses that can be beneficial in low doses. The objective of this work was to evaluate the effects of sub-doses of the herbicide 2,4-D choline salt on the biometric aspects of cotton in different phenological stages. A completely randomized experimental design was used, with seven replicates and the experimental treatments arranged by nine fractions of the average dose of herbicide 2,4-D choline salt: 0 (control); 0.4275; 0.855; 1.71; 3.42; 8.55; 17.1; 34.2 and 68.4 g ae ha⁻¹ applied at phenological stages V4 e B4 of cotton. The plants were evaluated for biometric parameters. The results were submitted to analysis of variance, and when significant, the hormesis model was tested in order to describe the dose-response curves with low dose stimulation. With the results obtained it is affirmed that the subdoses lower than 3.42 g ae ha⁻¹ of the herbicide 2,4-D salt choline applied in the V4 stage can increase the variable height and induce the greater production of leaves in the cotton plants. However, it should be noted that even though there was an increase in these variables, the effect of hormesis was not significant for the production of dry biomass. The sub-doses 0.855 and 1.71 g ae ha⁻¹ of the herbicide 2,4-D salt choline promoted hormesis for the variables, height, number of leaves, dry matter of shoot and total of plants of cotton in stage B4.

Keywords: synthetic auxins, *Gossypium hirsutum* L., hormetic effect, morphology.

2.1. INTRODUÇÃO

Herbicidas auxínicos foram a primeira classe de produtos seletivos no controle de plantas daninhas eudicotiledôneas em culturas de cereais. O primeiro herbicida comercialmente disponível com este mecanismo de ação, o 2,4-D, foi introduzido no mercado há cerca de 70 anos. Desde então, herbicidas dessa classe foram descobertos e introduzidos no mercado. Juntamente com essa diversificação, surgiu um amplo espectro de controle de plantas daninhas, aumentando a utilidade e a importância desse grupo de herbicidas, principalmente em áreas com plantas resistentes a outros herbicidas (COBB & READE, 2010).

Considerada como um dos principais entraves para agricultura mundial, a frequência de plantas daninhas resistentes a herbicidas aumentou na medida em que alguns programas de manejo dessas plantas se tornaram ineficientes. Por conta disso, cresceu o interesse de desenvolvimento de culturas resistentes aos diferentes herbicidas existentes no mercado. Todavia o desenvolvimento de cultivares de algodão e soja resistentes ao 2,4-D, por exemplo, criou uma grande preocupação devido o potencial de deslocamento desse herbicida para as culturas sensíveis (BLANCHETT et al., 2017).

Devido à alta volatilidade e solubilidade em água, o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) pode facilmente entrar na atmosfera por volatilização, deriva, lixiviação ou escoamento, resultando em ameaças potenciais a culturas sensíveis (NIU et al., 2018). O algodoeiro pode ser considerado como uma das culturas mais sensíveis ao herbicida 2,4-D, sendo que esse herbicida pode causar sintomas visuais que vão desde malformações foliares até epinastia severa e morte das plantas dependendo das condições ambientais, dose e principalmente do estágio de crescimento no momento da exposição (PETERSON et al., 2016).

Entre os efeitos que envolvem a presença de subdoses de herbicidas nas plantas, como ocorre no processo de deriva ou contaminação de tanques de pulverização, existe o efeito de hormesis que se refere a respostas adaptativas de sistemas biológicos para moderar desafios através dos quais o sistema melhora sua funcionalidade e/ou tolerância a desafios mais severos (CALABRESE & MATTSON, 2017). Como todos os herbicidas atuam em vias ou processos cruciais para as plantas, de forma inibitória ou estimulatória, baixas taxas de qualquer herbicida podem

ser usadas para modular o crescimento, desenvolvimento ou composição das plantas (BRITO et al., 2018).

Herbicidas à base de auxinas, como o 2,4-D, são exemplos de produtos químicos que aumentam o crescimento em concentrações não tóxicas, mas que são letais em doses mais elevadas (AMÉRICO et al., 2017). Assim, supõem-se que essas respostas podem ser esperadas através do aumento da produção e atividade de auxinas podendo interferir no crescimento e desenvolvimento morfológico das plantas (TAVARES et al., 2017).

Todavia Cedergreen et al. (2005), comentam que informações robustas de hormesis são obtidas por análise de regressão, comparando modelos de regressão não-lineares com e sem a simulação de crescimento hormético e avaliando qual modelo descreve melhor os resultados obtidos. Este procedimento não só confere maior credibilidade aos testes, mas também permite estimar o máximo efeito hormético, a concentração que proporciona tal efeito bem como a faixa de concentração que produz respostas estimulatórias.

Além disso, os poucos resultados existentes utilizaram a formulação amina e foram obtidos em cultivos de verão realizados nos estados do Paraná e de São Paulo, condições estas que não representam a atual situação da produção algodoeira no Brasil, que está concentrada nas regiões do bioma Cerrado. Diante disso, objetivou-se com a realização deste trabalho avaliar os efeitos de subdoses do herbicida 2,4-D sal colina sobre aspectos biométricos do algodoeiro herbáceo observando como o modelo utilizado foi alterado em função da exposição em diferentes estádios fenológicos.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

A fase experimental da presente pesquisa foi representada por um estudo conduzido em condições de casa de vegetação na Universidade Federal de Mato Grosso – Campus Universitário do Araguaia, localizado no município de Barra do Garças – MT, cujas coordenadas geográficas são 15°52'29,4" S e 52°18'35,1" O, durante o período de 13 de janeiro a 03 de junho de 2018.

As parcelas foram constituídas por vasos de plástico com capacidade de 20,0 L, preenchidos com substrato coletado na camada arável de um Latossolo Vermelho-

Amarelo Distroférico Húmico, seco e peneirado para a remoção de restos vegetais. Amostras compostas deste solo foram coletadas e enviadas para análise em laboratório. As características químicas e físicas deste substrato foram: pH em CaCl_2 de 4,4; $70,0 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria orgânica; valores não significativos de P resina; V de 9,5%; e teores de K, Ca, Mg e H+AL de 0,21; 0,63; 0,22 e $10,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente; 695 g kg^{-1} de areia, 125 g kg^{-1} de silte e 180 g kg^{-1} de argila.

Baseado na análise do solo, as correções de fertilidade e acidez constituíram de $3,0 \text{ g dm}^{-3}$ de calcário dolomítico e $0,35 \text{ g dm}^{-3}$ de superfosfato simples. O substrato dos vasos manteve-se úmido durante o período experimental através de irrigações automáticas programadas para dispensar quantidade de água próxima à capacidade de campo. As temperaturas mínimas e máximas diárias no interior da casa de vegetação durante o experimento são apresentadas na Figura 1.

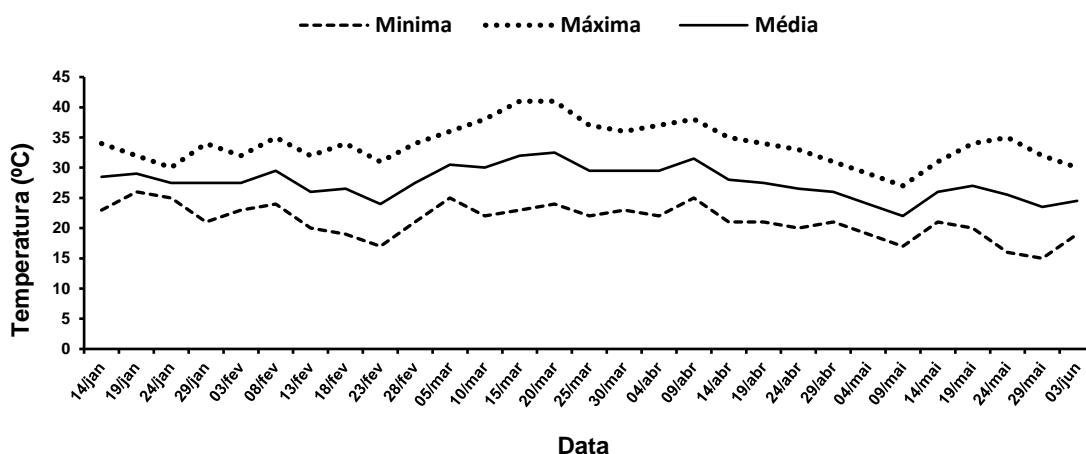


Figura 1. Temperaturas mínima, máxima e média ocorridas no interior da casa de vegetação durante o período de condução do experimento.

Foi adotado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com sete repetições onde cada vaso foi considerado uma unidade experimental. Os tratamentos experimentais foram dispostos por nove frações da dose média de rótulo do herbicida 2,4-D formulação sal colina: 0 (testemunha); 0,4275; 0,855; 1,71; 3,42; 8,55; 17,1; 34,2 e $68,4 \text{ g ea ha}^{-1}$ que foram estabelecidas em função da dose de $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ recomendada, a saber: 0; 0,0625%; 0,125%; 0,25%; 0,5%; 1,25%; 2,5%; 5% e 10%. As pulverizações do herbicida foram efetuadas em dois estádios fenológicos distintos

do algodoeiro, sendo V4 e B4. Para definição dos estádios fenológicos seguiu-se as recomendações de Marur & Ruano (2001) (Apêndice 01).

A semeadura foi realizada diretamente no vaso, a 5,0 cm de profundidade, em quantidade suficiente para garantir a emergência de aproximadamente três plantas, sendo que, logo após a emergência, realizou-se o desbaste de forma a permanecer apenas uma planta sadia por unidade experimental. Utilizou-se sementes da cultivar TMG 47 B2RF não-tolerante ao 2,4-D.

A aplicação das diferentes doses do herbicida 2,4-D sal colina foi realizada quando pelo menos 50% das plantas entraram no estágio fenológico correspondente ao objeto de estudo, com auxílio de pulverizador de pesquisa pressurizado a CO₂ contendo barra de pulverização munida por quatro pontas com indução de ar do tipo leque ADIA 110015, espaçadas 50 cm entre si, distantes 50 cm do alvo e calibrada a 1,8 kgf cm⁻², de modo a se obter consumo de calda equivalente a 150 L ha⁻¹.

Durante as aplicações, a velocidade do vento, a temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas por meio de uma estação meteorológica portátil, cujos valores corresponderam, respectivamente, a 6,1 km h⁻¹; 26,8 °C e 77,7 % nas aplicações no estágio V4 e 5,2 km h⁻¹, 25,4 °C e 71% nas aplicações no estágio B4.

As avaliações da cinética de emissão da fluorescência máxima da clorofila "α" foram realizadas aos 1; 3; 7 e 14 dias após a aplicação (DAA), com auxílio do fluorômetro portátil Handheld chlorophyll fluorometer OS30p+, para determinar a eficiência fotoquímica do fotossistema II (*Fv/Fm*). As avaliações foram realizadas nas folhas que representavam o estágio fenológico estudado com duas repetições por leitura, nas primeiras horas da manhã a fim de garantir a adaptação ao escuro pelas folhas. Os valores obtidos foram analisados pelo teste F e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade utilizando-se o programa estatístico Rbio (BHERING, 2017).

Os sintomas visuais de injúria foram avaliados aos 3, 7, 14, 21 e 30 DAA, atribuindo valores entre 0 (nenhuma injúria observada) e 100% (morte das plantas). Salienta-se que as avaliações visuais de 3, 7, 14 e 21 DAA serviram como parâmetro para a avaliação de 30 DAA. A caracterização das plantas de algodoeiro submetidas a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina foi realizada aos 30 DAA, determinando a altura das plantas, diâmetro do colo e número de folhas.

As plantas foram então coletadas e seccionadas em parte aérea e raiz, sendo embaladas em sacos de papel e mantidas em estufa de circulação forçada de ar a 65

°C durante três dias, momento a qual as amostras foram pesadas em balança de precisão de 0,01 grama para determinação da matéria seca da raiz, da parte aérea e total (raiz + parte aérea).

Os valores obtidos para as variáveis citadas foram analisados pelo teste F e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade utilizando-se o programa estatístico Rbio (BHERING, 2017). Quando significativos, testou-se o modelo de regressão de Brain & Cousens (1989), adaptado por Ritz et al. (2015), para análise do efeito de hormesis com o objetivo de descrever as curvas de dose-resposta com estímulo em baixas doses:

$$y = c + \frac{d - c + fx}{1 + \exp(b(\log(x) - \log(e)))}$$

onde y = produção do tratamento; x = dose do herbicida; e = ED50, que é definido como a dose que proporciona 50% do efeito total alcançável; d = limite superior; c = limite inferior; b = denota a inclinação relativa em torno de e ; f = termo linear. Os modelos foram montados pelo software R Core Team (2016), e os gráficos foram plotados pelo programa Origin 8.5.1 SR1.

Para as variáveis que não apresentaram hormesis os dados foram ajustados ao modelo de regressão não-linear do tipo polinomial pelo programa Origin 8.5.1 SR1. Para escolha do modelo de regressão foi considerado o maior valor do coeficiente de determinação (R^2) a $p \leq 0,05$ de acordo com o teste F, respeitando-se a resposta biológica.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos visuais de injúria (%) aos 30 DAA do herbicida 2,4-D sal colina foram superiores a 20% a partir da dose de 1,71 g ea ha⁻¹, com comportamento quadrático e ascendente, chegando a 95% de injúria quando aplicado 68,4 g ea ha⁻¹ do herbicida no estágio V4 (Figura 2).

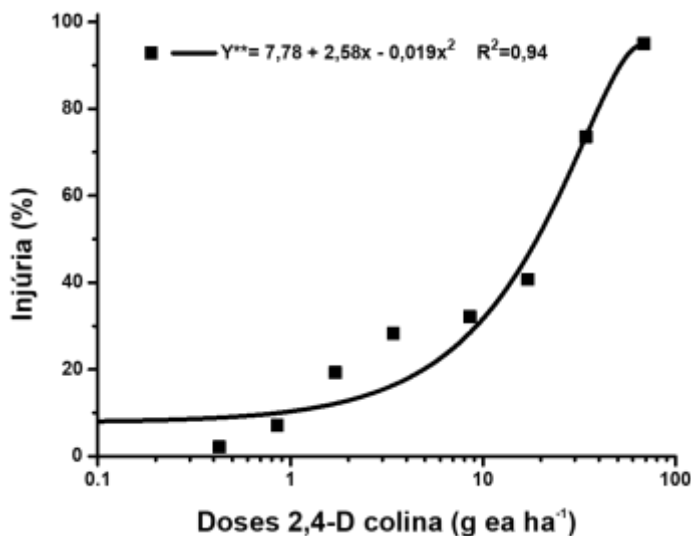


Figura 2 - Injúria visual (%) aos 30 DAA provocada por subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 de plantas de algodoeiro herbáceo. ** Significativo ($p \leq 0,01$).

Salienta-se que as principais injúrias observadas nesse estágio foram epinastia dos ramos e enrugamento do ápice caulinar e das folhas jovens principalmente em doses mais elevadas. Segundo Smith et al. (2017), plantas de algodoeiro na fase inicial de crescimento até o sexto estágio foliar (V6) são mais sensíveis a exposições de doses de 2,4-D, visto que a sensibilidade do algodoeiro ao herbicida possa ser aumentada devido ao reduzido vigor da planta e a falta de uma cutícula completamente desenvolvida, facilitando a difusão passiva do herbicida, ocasionando danos as paredes celulares das folhas.

Destaca-se que neste estudo, níveis de injúria superiores a 20 e 70% foram observados quando se aplicou doses superiores a 1,71 e 34,2 g ea ha⁻¹ aos 30 DAA, respectivamente. Corroborando com os dados encontrados nessa pesquisa, Byrd et al. (2016) afirmam que percentuais de injúria superiores a 29 e 49% foram observados para as doses de 2,0 e 40 g ea ha⁻¹ de 2,4-D sal amina aplicada também no estágio V4, porém aos 14 DAA.

Subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 do algodoeiro podem incrementar a variável altura e induzir a maior produção de folhas nas plantas, visto que o modelo de hormesis foi significativo para estas variáveis apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,90 (Tabela 1).

Nota-se que mesmo havendo incremento nessas variáveis, o efeito de hormesis não foi significativo para a produção de biomassa seca, uma vez que os

dados de matéria seca da raiz (MSR), da parte aérea (MSPA) e total (MST) ajustaram-se ao modelo de regressão não-linear do tipo polinomial. De acordo com os estudos de Oiveira et al. (2015), a aplicação das subdoses 0,45; 0,90; 1,35 e 1,80 g i.a ha de 2,4-D sal amina influenciou negativamente a cultura do algodão no estágio V1 para os parâmetros, altura de plantas, diâmetro de caule, número de folhas e massas frescas de caule, raiz e parte aérea.

Tabela 1. Valores de F, coeficientes de determinação e coeficientes das equações de regressão para análise das variáveis biométricas de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio V4. Valores máximos de crescimento estimados e dose do herbicida para estes valores.

Variável	F	R ²	Parâmetros da regressão Com Hormesis					V. máx. ⁶	
			b	c	d	e	f	% da test. ⁴	Dose ⁷
Altura (cm)	1107,22**	0,99	1,34	-12,68	57,60	10,31	6,30	7,6	3,42
Nº de Folhas	103,36**	0,92	1,75	-0,06	11,96	11,95	1,23	21,08	3,42

Variável	F	R ²	Parâmetros da regressão Sem Hormesis		
			a	b	c
MSR (g) ¹	89,01**	0,95	5,39	0,02	-0,0014
MSPA (g) ²	64,15**	0,94	14,07	-0,35	0,0025
MST (g) ³	79,37**	0,95	19,46	-0,32	0,0011
D. do colo (mm) ⁵	73,65**	0,94	9,36	0,04	-0,0012

**Significativo a 1% de probabilidade. /1 – Matéria seca da raiz; /2 – Matéria seca da parte aérea; /3 Matéria seca total; /4 - % da testemunha; 5/ - Diâmetro do colo; 6/ Valores máximos; /7 (g ea ha⁻¹).

Conforme exposto anteriormente, um dos principais sintomas observados devido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em plantas de algodoeiro em estágio V4 foi o enrugamento do ápice caulinar e das folhas jovens, sintoma também conhecido como “pata de rã”. Segundo Constantin et al. (2007) esse sintoma é descrito como típico de intoxicação por 2,4-D que ocorre principalmente nas folhas novas que saem após a ocorrência da contaminação, culminando em perda de área fotossintética e conseqüente perda de biomassa seca. Neste experimento ainda foi

possível observar que as plantas produziram uma quantidade maior de folhas novas deformadas, devido, supostamente, a uma tentativa de escapar ao estresse promovido pela aplicação de subdoses do herbicida (ABBAS et al., 2016).

Observando as curvas que representam a altura e o número de folhas de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio V4 (Figura 3), nota-se que os valores máximos para ambas variáveis foram estimados na dose de 3,42 g ea ha⁻¹ do herbicida, apresentando incremento de 7,6 e 21,08%, respectivamente, em relação a testemunha. Destaca-se que as doses acima do valor citado diminuiriam a altura e o número de folhas, tornando evidente o efeito herbicida do 2,4-D sal colina.

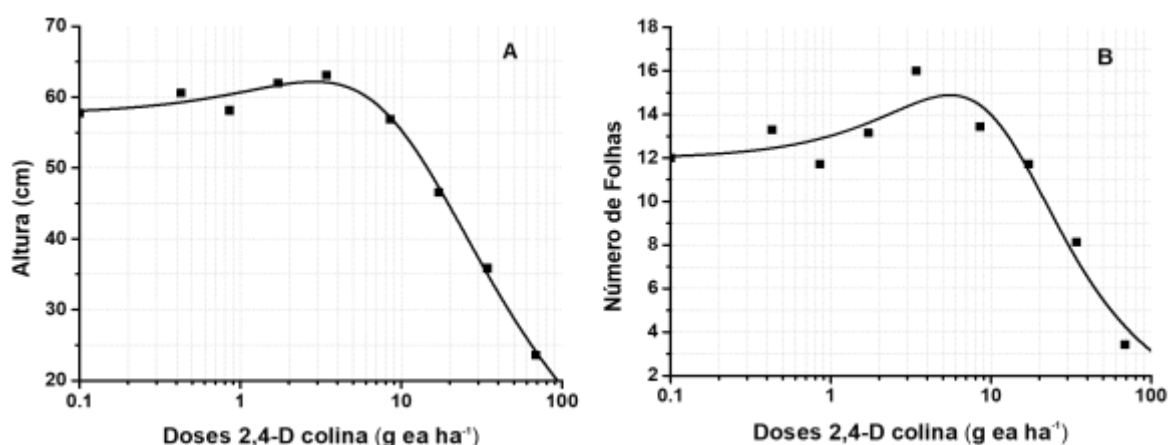


Figura 3 - Curvas representando a altura (A) e o número de folhas (B) de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio V4.

Constatou-se que a variável Fv/Fm , que avalia a eficiência do aparato fotossintético do algodoeiro, foi afetada pela aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio V4, mostrando que algumas subdoses ocasionaram danos ao aparato fotoquímico e nas características da fluorescência da clorofila α do algodoeiro (Tabela 2).

Verifica-se que ao 1 DAA não foi constatada diferença significativa entre as doses do herbicida, porém salienta-se que nas avaliações subsequentes, 3 e 7 DAA, foi possível observar diferença significativa entre a testemunha e as demais subdoses. Todavia, houve aumento nos valores de eficiência quântica do fotossistema II para as subdoses 0,4275; 0,855; 1,71 e 3,42 g ea ha⁻¹ aos 14 DAA, não sendo observadas assim, diferenças estatísticas entre essas subdoses e a testemunha nesse período.

Tabela 2 - Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio V4.

Doses (g ea ha ⁻¹)	Fv/Fm			
	1 DAA	3 DAA	7 DAA	14 DAA
0	0,7849	0,7834 a	0,7841 a	0,7850 a
0,4275	0,7719	0,7293 b	0,7554 b	0,7709 a
0,855	0,7711	0,7301 b	0,7600 b	0,7713 a
1,71	0,7727	0,7320 b	0,7546 b	0,7693 a
3,42	0,7787	0,7358 b	0,7565 b	0,7660 a
8,55	0,7706	0,7183 b	0,7163 c	0,7466 b
17,1	0,7687	0,7251 b	0,7393 c	0,7306 b
34,2	0,7694	0,7297 b	0,7160 c	0,7303 b
68,4	0,7684	0,7067 b	0,7289 c	0,6989 c
F Doses	1,70 ^{NS}	7,07 ^{**}	9,24 ^{**}	18,78 ^{**}
CV (%)	1,42	3,07	2,75	2,24

NS – Não significativo; ** Significativo a 1% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Yusuf et al. (2010) a análise da fluorescência da clorofila α é capaz de detectar com segurança e confiabilidade efeitos de estresse e injúrias no processo fotossintético causados por diversos fatores. As mudanças na cinética de emissão de fluorescência da clorofila α de organismos fotossintéticos, são resultados de frequentes modificações na atividade fotossintética, principalmente com relação a eficiência quântica do transporte de elétrons através do fotossistema II em folhas.

Destaca-se que nesse estudo apenas para a dose de 68,4 g ea ha⁻¹ aos 14 DAA foi possível observar valores de Fv/Fm inferiores a 0,700, implicando que 10% da dose recomendada em rótulo foi capaz de reduzir de forma mais drástica a eficiência fotossintética do algodoeiro em estágio V4. A literatura relata que plantas sob ausência de estresse apresentam potencial de rendimento quântico (Fv/Fm) na faixa de 0,75 a 0,85 (CORRÊA & ALVES, 2010). Portanto, as subdoses superiores a 3,42 g ea ha⁻¹ aos 14 DAA promoveram distúrbios no aparato fotossintético, visto que valores abaixo de 0,75 demonstram que as folhas certamente foram submetidas a dano fotoinibitório.

Os efeitos visuais de injúria (%) aos 30 DAA do herbicida 2,4-D sal colina foram superiores a 20% a partir da dose de 3,42 g ea ha⁻¹, com comportamento quadrático

e ascendente chegando a 90% de injúria quando aplicado 68,4 g ea ha⁻¹ do herbicida, no estágio B4 (Figura 4).

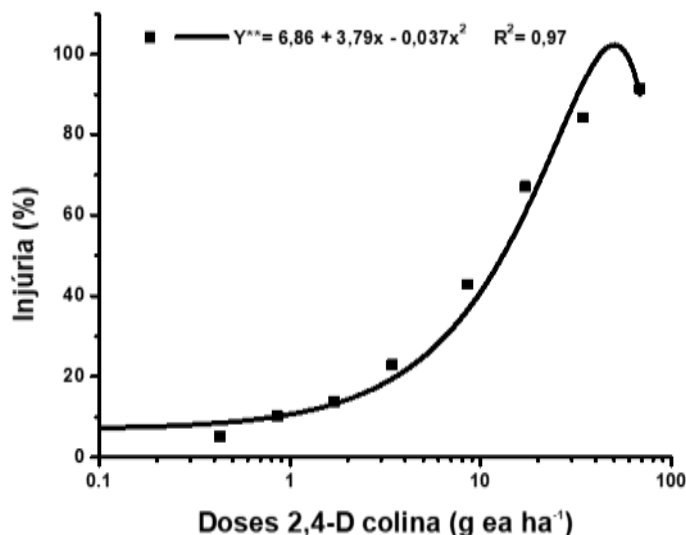


Figura 4 - Injúria visual (%) aos 30 DAA provocada por subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio B4 de plantas de algodoeiro herbáceo. ** Significativo ($p \leq 0,01$).

As principais injúrias visuais observadas nesse estágio foram epinastia do pecíolo das folhas, manchas foliares arroxeadas, ressecamento foliar e morte do ápice caulinar principalmente em doses mais elevadas. Segundo Yamashita et al. (2013) a fitotoxicidade do 2,4-D pode variar nas plantas desde uma leve epinastia nas folhas, seguida pela deformação até a morte da planta.

Nesta pesquisa observou-se que doses abaixo de 1,71 g ea ha⁻¹ apresentaram danos inferiores a 10% de injúria aos 30 DAA. Byrd et al. (2016) comentam que como tem sido amplamente conhecido desde a descoberta do 2,4-D, o algodoeiro é extremamente sensível a este herbicida principalmente durante os estádios vegetativos, visto que a partir dos estádios de pré-florescimento essa sensibilidade cai devido as folhas estarem mais desenvolvidas, contendo ceras cuticulares mais espessas e com composição química menos variável em comparação com folhas imaturas, o que pode influenciar a absorção de herbicidas.

De acordo com Egan et al. (2014), durante os estádios de botões florais (pré-florescimento), o algodoeiro apresentou baixa sensibilidade às exposições de 0,56 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D, sendo os valores de injúrias visuais de apenas 9%. Porém, as plantas apresentaram maior sensibilidade às doses de 5,6 e 56,0 g ea ha⁻¹ com 33

e 71% de injúria, respectivamente. Todavia, os autores comentam que houve grande variação dos resultados obtidos, indicando que os sintomas visuais de injúria só podem servir como um preditor grosseiro da perda de rendimento final.

Observa-se que subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio B4 podem incrementar a variável altura e induzir a maior produção de folhas, de matéria seca da parte aérea (MSPA) e total (MST) nas plantas do algodoeiro, visto que o modelo de hormesis foi significativo para estas variáveis, apresentando coeficientes de determinação de 0,97; 0,96; 0,95 e 0,97, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores de F, coeficientes de determinação e coeficientes das equações de regressão para análise das variáveis morfológicas de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio B4. Valores máximos de crescimento estimados e dose do herbicida para estes valores.

Variável	F	R ²	Parâmetros da regressão Com Hormesis					V. máx. ⁶	
			b	c	d	e	f	% da test. ⁴	Dose ⁷
Altura (cm)	359,09**	0,97	1,26	29,03	60,23	5,85	4,79	1,33	1,71
Nº de Folhas	197,31**	0,96	1,28	-5,43	17,20	3,55	7,84	16,33	1,71
MSPA (g) ²	186,51**	0,95	1,11	-33,08	26,89	2,08	30,67	10,00	0,855
MST (g) ³	319,87**	0,97	1,10	-51,79	39,41	2,78	33,30	6,45	0,855
Variável	F	R ²	Parâmetros da regressão Sem Hormesis						
			a	b	c				
MSR (g) ¹	32,22**	0,88	12,49	-0,19	0,0013				
D. (mm) ⁵	30,96**	0,88	9,68	-0,02	0,00005				

**Significativo a 1% de probabilidade. /1 – Matéria seca da raiz; /2 – Matéria seca da parte aérea; /3 Matéria seca total; /4 - % da testemunha; 5/ - Diâmetro do colo; 6/ Valores máximos; /7 (g ea ha⁻¹).

Todavia, nota-se que o efeito de hormesis não foi significativo para a produção de matéria seca da raiz (MSR) e diâmetro do colo, sendo que os valores se ajustaram ao modelo de regressão não-linear do tipo polinomial (Tabela 3). Segundo Velini et al. (2008) para se observar efeito de hormesis nas raízes é necessário maior tempo de cultivo das plantas, visto que utilizando o herbicida glyphosate, foi observado incremento no sistema radicular em plantas de eucalipto e pinus que foram cultivadas por maior tempo, e não houve incremento em plantas de soja e milho que foram cultivadas por período menor.

Observando as curvas que representam a altura (Figura 5A), o número de folhas (Figura 5B), matéria seca da parte aérea (Figura 5C) e total (Figura 5D) de plantas de algodoeiro submetidas a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4, nota-se que os valores máximos para as variáveis foram estimados nas doses de 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ do herbicida, apresentando incremento de 1,33; 16,33; 10,00 e 6,45%, respectivamente, em relação a testemunha. Destaca-se que as doses acima do valor citado diminuíram as variáveis, tornando evidente o efeito herbicida do 2,4-D sal colina.

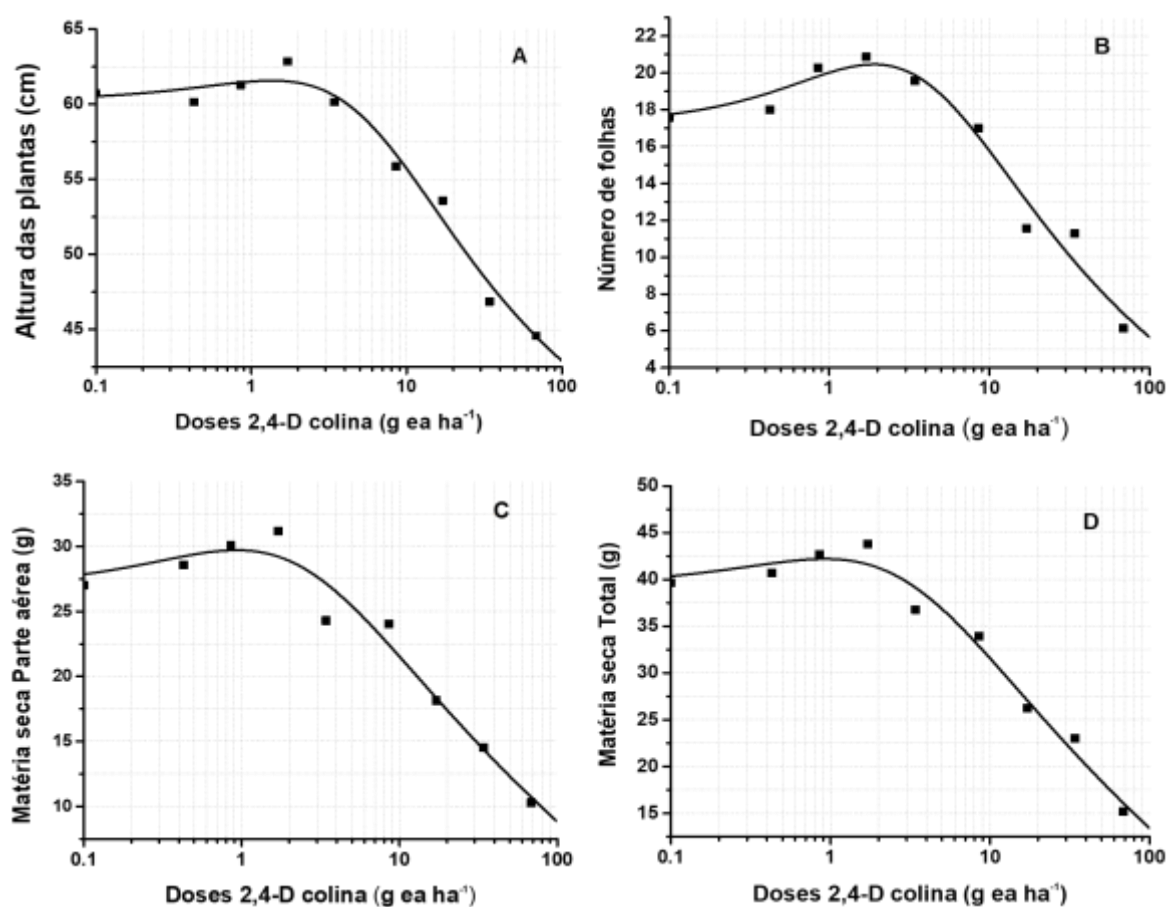


Figura 5 - Curvas representando a altura (A), número de folhas (B), matéria seca da parte aérea (C) e total (D) de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4.

Foi possível observar que, para as aplicações do herbicida no estágio B4, o incremento nas variáveis altura e número de folhas influenciaram na produção de biomassa seca das plantas de algodoeiro, podendo dessa forma, incrementar parâmetros produtivos das plantas. No trabalho de Américo et al. (2016), utilizando as

subdoses de 0,68, 1,36, 2,04 2,72 e 3,40 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal amina em plantas também no estágio B4, os autores verificaram que com o aumento das subdoses ocorreu maior crescimento em altura das plantas de algodão, o que acarretou em incremento na produtividade devido a maior formação de ramos reprodutivos.

Nesta pesquisa o incremento provocado pela aplicação de 0,125% e 0,25% da dose de 2,4-D sal colina recomendada em rótulo variou entre 1,33 a 16,33% em relação à testemunha, quando aplicados no estágio B4 do algodoeiro. Duke et al. (2006) descrevem que em mais de trinta casos de tratamentos de plantas cultivadas com herbicidas em doses subletais, a dose de resposta máxima da hormesis pode ser observada em até 20% da concentração recomendada em rótulo, com respostas que podem alcançar em torno de 50% de incremento da variável analisada, sendo que estímulos podem ser verificados em características de crescimento, como ganho de peso, altura, comprimento e área foliar e/ou características internas como teor proteico e níveis de açúcares.

Velini et al. (2010) acrescentam que apesar do benefício que pode ser observado, baixas doses de herbicidas não são recomendadas como estimulante de crescimento para culturas, pois as doses que provocam o efeito de hormesis podem variar consideravelmente dependendo de diversos fatores, como clima, cultivar, estágio fenológico e formulação.

A variável F_v/F_m foi afetada pela aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina superiores a 3,42 g ea ha⁻¹ no estágio B4, mostrando que essas subdoses ocasionaram danos ao aparato fotoquímico e nas características da fluorescência da clorofila α do algodoeiro. Observa-se que ao 1 DAA não foram observadas diferenças significativas entre as subdoses do herbicida, salientando que nas avaliações subsequentes, 3, 7 e 14 DAA, não foi possível observar diferença significativa entre a testemunha e as subdoses 0,4275; 0,855; 1,71 e 3,42 g ea ha⁻¹, uma vez que essas diferenciaram das maiores doses (Tabela 4).

Tabela 4 - Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estádio B4.

Doses (g ea ha ⁻¹)	Fv/Fm			
	1 DAA	3 DAA	7 DAA	14 DAA
0	0,7691	0,7661 a	0,7617 a	0,7619 a
0,4275	0,7659	0,7554 a	0,7500 a	0,7660 a
0,855	0,7614	0,7649 a	0,7559 a	0,7549 a
1,71	0,7677	0,7629 a	0,7501 a	0,7517 a
3,42	0,7427	0,7407 a	0,7366 a	0,7131 a
8,55	0,7551	0,7083 b	0,6440 b	0,6200 b
17,1	0,7504	0,7150 b	0,5810 c	0,5299 c
34,2	0,7403	0,7184 b	0,4740 d	0,4141 d
68,4	0,6967	0,6061 c	0,3750 e	0,1604 e
F Doses	1,77 ^{NS}	9,96 ^{**}	42,32 ^{**}	113,38 ^{**}
CV (%)	5,97	5,83	8,91	8,5

NS – Não significativo; ** Significativo a 1% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Dentre os diversos parâmetros de fluorescência da clorofila que podem ser medidos, o máximo rendimento quântico fotoquímico do fotossistema II (Fv/Fm), frequentemente avaliado pela máxima taxa de fluorescência da clorofila α , tem sido amplamente utilizado para comparar tecidos saudáveis e danificados (ROUSSEAU et al., 2013). Na Tabela 4 é importante destacar que mesmo não havendo diferença significativa entre as doses ao 1 DAA percebe-se que para 10% da dose recomendada em rótulo foi possível observar valores de Fv/Fm inferiores a 0,700. Verificou-se também que já aos 3 DAA esse comportamento ocorreu para as subdoses superiores a 3,42 g ea ha⁻¹ evidenciando que essas subdoses podem conferir reduções drásticas a eficiência fotossintética do algodoeiro em estádio B4.

Segundo Silva et al. (2014) a eficiência quântica do fotossistema II pode ser um bom indicador de danos ao aparato fotossintético promovido pelos herbicidas mesmo em doses baixas, visto que os valores entre 0,75 e 0,85, em plantas estressadas ou não, são considerados normais. Por conta disso, infere-se que há uma segurança aparente das subdoses 0,4275; 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal colina ao aparato fotossintético, caso haja contaminação em algodoeiro no estádio B4, visto que neste trabalho observou-se que os valores de Fv/Fm para essas subdoses estiveram acima de 0,75 durante todo o período experimental.

2.4. CONCLUSÕES

Os sintomas visuais de injúria (%) em plantas de algodoeiro no estágio V4 e B4 aos 30 DAA tiveram comportamento quadrático e ascendente conforme aumentou-se as subdoses do herbicida 2,4-D sal colina.

As subdoses inferiores a 3,42 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 incrementam a variável altura e induzem a maior produção de folhas nas plantas do algodoeiro. Entretanto nota-se que o efeito de hormesis não foi significativo para a produção de biomassa seca total.

A variável Fv / Fm foi afetada pela aplicação de subdoses superiores a 3,42 g ea ha⁻¹ de 2,4-D sal colina aos 14 DAA no estágio V4 do algodoeiro.

As subdoses de 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D sal colina promoveram hormesis para as variáveis altura, número de folhas matéria seca da parte aérea e total de plantas do algodoeiro em estágio B4.

A variável Fv / Fm não foi afetada pela aplicação de subdoses inferiores a 3,42 g ea ha⁻¹ de 2,4-D sal colina no estágio B4 do algodoeiro.

2.5. REFERÊNCIAS

- ABBAS, T. et al. Low doses of fenoxaprop-p-ethyl cause hormesis in littleseed canarygrass and wild oat. **Planta Daninha**, v. 34, n. 3, p. 527-533, 2016.
- AMÉRICO, G. H. P. et al. Desenvolvimento e produtividade do algodoeiro em função da aplicação de subdoses de ácido diclorofenoxiacético e cloreto de mepiquat. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 91, n. 2, p. 117-129, 2016.
- AMERICO, G. H. P.; AMERICO-PINHEIRO, J. H. P.; FURLANI JR, E. Hormesis Effect of Dichlorophenoxy Acetic Acid Sub-Doses and Mepiquat Chloride on Cotton Plant. **Planta Daninha**, v. 35, 2017.
- BHERING, L.L. RBIO: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17: p. 187-190, 2017.
- BLANCHETT, B. H. et al. The Effect of 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2, 4-D) on Peanut when Applied During Vegetative Growth Stages. **Peanut Science**, v. 44, n. 1, p. 53-59, 2017.
- BRAIN, P.; COUSENS, R. An equation to describe dose responses where there is stimulation of growth at low doses. **Weed Research**, v. 29, n. 2, p. 93-96, 1989.

- BRITO, I. P. F. S et al. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018.
- BYRD, S. A. et al. Cotton stage of growth determines sensitivity to 2, 4-D. **Weed Technology**, v. 30, n. 3, p. 601-610, 2016.
- CALABRESE, E. J.; MATTSON, M. P. How does hormesis impact biology, toxicology, and medicine? **NPJ Aging and Mechanisms of Disease**, v. 3, n. 1, p. 13, 2017.
- CEDERGREEN, N.; RITZ, J. C.; STREIBIG, B. Improved empirical models describing hormesis. **Environment Toxicology Chemical**, v. 24, p. 3166-3172, 2005.
- COBB, H.; READE, J. P. H. Herbicide discovery and development. **Herbicides and Plant Physiology**, v. 2, p. 27-49, 2010.
- CONSTANTIN, J. et al. Efeito de subdoses de 2,4-D na produtividade do algodão e suscetibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 24-29, 2007.
- CORRÊA, M. J. P.; ALVES, P. L. C. A. Efeitos da aplicação de herbicidas sobre a eficiência fotoquímica em plantas de soja convencional e geneticamente modificada. **Ciência e Agrotecnologia**, p. 1136-1145, 2010.
- DUKE, S. O. et al. Hormesis: is it an important factor in herbicide use and allelopathy. **New York: Outlooks on Pest Management**, v. 17, n. 1, p. 29-33, 2006.
- EGAN, J. F.; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A meta-analysis on the effects of 2,4-D and dicamba drift on soybean and cotton. **Weed Sciences**, v. 62, p. 193-206, 2014.
- MARUR, C. J. L; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 5, n. 2, p. 313-317, 2001.
- NIU, J. et al. Dicationic Ionic Liquids of Herbicide 2, 4-Dichlorophenoxyacetic Acid with Reduced Negative Effects on Environment. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, v. 66, n. 40, p. 10362-10368, 2018.
- OIVEIRA, D. P. et al. Alterações morfológicas na cultura do algodão provocada por subdoses de 2, 4-D na fase inicial de desenvolvimento da cultura. **Revista Cultivando o Saber**, v. 8, n. 4, p. 414-426, 2015.
- PETERSON, M. A. et al. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2016. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- RITZ, C. et al. Dose-Response Analysis Using R. **PLoS ONE**, v. 10, n. 12, 2015.
- ROUSSEAU, C. et al. High throughput quantitative phenotyping of plant resistance using chlorophyll fluorescence image analysis. **Plant Methods**, v. 9, n. 1, p. 9-17, 2013.
- SILVA, F. B. et al. Chlorophyll fluorescence as an indicator of cellular damage by glyphosate herbicide in *Raphanus sativus* L. plants. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 16, p. 2509-2519, 2014.

SMITH, H. C. et al. Cotton Response to Simulated Auxin Herbicide Drift Using Standard and Ultra-low Carrier Volumes. **Weed Technology**, v. 31, n. 1, p. 1-9, 2017.

TAVARES, C. J. et al. Crescimento inicial de plantas de pequi após aplicação de 2, 4-D. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 81-87, 2017.

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

VELINI, E. D. et al. Growth regulation and other secondary effects of herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 3, p. 351-354, 2010.

YAMASHITA, O. M. et al. Deriva simulada de herbicidas em mudas de *Coffea canephora*. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 12, n. 2, p. 148-156, 2013.

YUSUF, M. A. et al. Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1797, n. 8, p. 1428-1438, 2010.

CAPÍTULO 3 – HORMESIS DE 2,4-D SAL COLINA EM ASPECTOS QUALI-QUANTITATIVOS DE ALGODOEIRO CULTIVADO NO CERRADO

RESUMO – Em condições de campo uma aplicação regular de herbicidas pode induzir o efeito de hormesis, como por exemplo quando doses baixas não intencionais atingem culturas vizinhas, causando o efeito benéfico de uma substância tóxica. Por conta disso o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de subdoses do herbicida 2,4-D sal colina sobre a produtividade do algodoeiro herbáceo não-tolerante, em diferentes estádios fenológicos. Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições e os tratamentos distribuídos em esquema fatorial 9 x 3, sendo nove frações da dose média de rótulo do herbicida 2,4-D formulação sal colina (0 (testemunha); 0,4275; 0,855; 1,71; 3,42; 8,55; 17,1; 34,2 e 68,4 g ea ha⁻¹) associadas a três diferentes momentos de exposição durante o estágio fenológico do algodoeiro, a saber: V4, B4 e C4. As plantas foram avaliadas quanto aos principais parâmetros produtivos do algodoeiro. Os resultados foram submetidos a análise de variância, e quando significativos testou-se o modelo de hormesis com o objetivo de descrever as curvas de dose-resposta com estímulo em baixas doses. Com os resultados obtidos afirma-se que, quando aplicadas no estágio V4, as subdoses do herbicida 2,4-D sal colina afetam os parâmetros produtivos do algodoeiro. As subdoses 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ promovem hormesis para as todas as variáveis produtivas de algodoeiro em estágio B4 avaliadas. Plantas de algodoeiro em estágio C4 não são afetadas pela aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina. As variáveis qualitativas da fibra de algodão não são afetadas pela exposição ao herbicida. A idade das plantas de algodoeiro submetidas a aplicações de 2,4-D sal colina pode influenciar na qualidade da fibra, há vendodiferença significativa para as variáveis STR, ELG e +b.

Palavras-chave: Auxina sintética, *Gossypium hirsutum* L., efeito hormético, produtividade.

CHAPTER 3 - HORMESIS OF 2,4-D CHOLINE SALT IN QUALI-QUANTITATIVE ASPECTS OF COTTON CULTIVATED IN BRAZILIAN SAVANNA

SUMMARY - In field conditions a regular application of herbicides may induce the effect of hormesis, for example when unintentional low doses reach neighboring crops, causing the beneficial effect of a toxic substance. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effects of sub-doses of herbicide 2,4-D choline salt on the productivity of non-tolerant cotton in different phenological stages. The experimental design was a randomized block, with four replicates and the treatments distributed in a 9 x 3 factorial scheme, with nine fractions of the average dose of the herbicide 2,4-D label formulation (0 (control), 0, 42.5, 0.855, 1.71, 3.42, 8.55, 17.1, 34.2 and 68.4 g ae ha⁻¹) associated with three different exposure times during the cotton phenological stage, V4, B4 and C4. The plants were evaluated for the main productive parameters of the cotton plant. The results were submitted to analysis of variance, and when significant the hormesis model was tested in order to describe dose-response curves with low dose stimulus. With the results obtained, it is stated that, when applied in the V4 stage, 2,4-D choline salt sub-doses affect drastically the production parameters of the cotton plant. The sub-doses 0.855 and 1.71 g ae ha⁻¹ promoted hormesis for all productive variables of cotton in B4 stage. Cotton plants in C4 stage are not affected by the application of 2,4-D choline salt subdoses. The qualitative variables of cotton fiber are not affected by exposure to the herbicide. The age of cotton plants submitted to applications of 2,4-D choline salt may influence the fiber quality, there was a significant difference in the variables STR, ELG and + b.

Keywords: synthetic auxin, *Gossypium hirsutum* L., hormetic effects, productivity

3.1. INTRODUÇÃO

As condições climáticas favoráveis, a topografia que permite a mecanização da agricultura, os programas governamentais de incentivo e principalmente, a adoção intensiva de tecnologias modernas, são os principais fatores que impulsionaram o cultivo de algodoeiro no Cerrado brasileiro (ZONTA et al., 2014).

Por conta desse crescimento das áreas algodoeiras nas regiões do Cerrado convivendo com áreas já cultivadas com outras culturas e da liberação antecipada de cultivares de algodão, milho e soja resistentes ao 2,4-D, aumentou as preocupações dos cotonicultores devido a possíveis contaminações decorrentes da aplicação de herbicidas nas culturas vizinhas (BYRD et al., 2016).

Segundo Sosnoskie et al. (2015), algodoeiro geneticamente modificado para ser resistente a aplicações tóxicas de 2,4-D poderia fornecer aos produtores uma ferramenta adicional para o manejo de espécies de folha larga difíceis de controlar. No entanto, a adoção bem-sucedida desta tecnologia dependerá da capacidade dos produtores de gerenciar o movimento de herbicidas fora do alvo.

O herbicida 2,4-D é conhecido por causar danos significativos a culturas sensíveis, como o algodoeiro, quando a exposição fora do alvo ocorre como resultado de contaminação do tanque de pulverização, deriva de herbicida e movimento devido à volatilização (EGAN et al., 2014). Mesmo quando aplicado em associação com outros produtos, os problemas de fitotoxicidade na maioria das vezes são atribuídos ao herbicida 2,4-D, detectado principalmente por seus sintomas bastante característicos (MOTA, 2015).

Em campo e em pequena escala as doses de herbicidas não são uniformes, o que significa que culturas sensíveis podem não sofrer danos por não receberem doses suficientes para isso. Como todos os herbicidas atuam em vias ou processos cruciais para as plantas, baixas doses de qualquer herbicida podem ser usadas para modular o crescimento, desenvolvimento, produtividade ou composição das plantas (BRITO et al., 2018).

Esse fenômeno, conhecido como hormesis, no qual ocorrem efeitos estimulatórios sobre uma ou várias características de algum organismo por conta de baixas doses de toxinas, é cada vez mais aceito na biologia vegetal devido a hormesis provocada por herbicidas (BELZ et al., 2018).

Mesmo uma aplicação regular de herbicidas pode induzir a hormesis, como quando doses baixas parecem não intencionais, como pela deposição de deriva, heterogeneidade das doses em pequena escala, contato de folhas entre plantas tratadas e não tratadas, efeito guarda-chuva, resistência a herbicidas e contaminações em tanque (VELINI et al., 2010; VELINI et al., 2017).

Herbicidas à base de auxinas, como o 2,4-D, são exemplos de produtos químicos que aumentam o crescimento em concentrações não tóxicas, mas que são letais em doses mais elevadas (AMÉRICO et al., 2017). Assim, supõem-se que essas respostas podem ser esperadas através do aumento da produção e atividade de auxinas podendo interferir na produtividade das plantas (OIVEIRA et al., 2015).

Os estudos encontrados na literatura não utilizaram curvas de dose-resposta para explicar os eventos observados, o que pode comprometer a correta identificação do efeito de hormesis (CEDERGREEN et al., 2005). Além disso, os poucos resultados existentes utilizaram a formulação amina e foram obtidos em cultivos de verão realizados nos estados do Paraná e de São Paulo, condições estas que não representam a atual situação da produção algodoeira no Brasil, concentrada nas regiões do bioma Cerrado.

Diante ao exposto, objetivou-se com a realização deste trabalho avaliar o efeito de hormesis de subdoses do herbicida 2,4-D, formulação sal colina, sobre as variáveis produtivas do algodoeiro herbáceo não tolerante ao herbicida, observando como o modelo utilizado foi alterado em função da exposição em diferentes estádios fenológicos.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

A fase experimental da presente pesquisa foi representada por um estudo conduzido em condições de campo, com unidade experimental em área de cultivo de algodoeiro pertencente à Fazenda Santa Terezinha do grupo Agropecuária Fazenda Brasil (AFB), localizado no município de Nova Xavantina – MT, cujas coordenadas geográficas são 15°00'52,2" S e 52°31'37,2" O, durante o período de 26 de janeiro a 07 de julho de 2018.

O clima da região segundo classificação de Köppen (1948) é do tipo Aw, caracterizado como possuindo temperaturas médias superiores a 27 °C nos meses

mais quentes (novembro a fevereiro), temperaturas médias superiores a 18°C nos meses mais frios (junho a agosto) e com média de precipitação anual entre 1000 e 1500 mm distribuídos em dois períodos bem definidos em termos de precipitação: época de chuvas intensas entre os meses de outubro a março e nítido período de estiagem entre os meses de abril a setembro (MARCHI et al., 2017).

Adotou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições e os tratamentos distribuídos em esquema fatorial 9 x 3, sendo nove frações da dose média de rótulo do herbicida 2,4-D formulação sal colina (0 (testemunha); 0,4275; 0,855; 1,71; 3,42; 8,55; 17,1; 34,2 e 68,4 g ea ha⁻¹) que foram estabelecidas em função da dose de 1,5 L ha⁻¹ recomendada em rótulo, a saber: 0; 0,0625%; 0,125%; 0,25%; 0,5%; 1,25%; 2,5%; 5% e 10%, associadas a três diferentes momentos de exposição durante o estágio fenológico do algodoeiro, a saber: V4, B4 e C4. Para definição dos estádios fenológicos seguiu-se as recomendações de Marur & Ruano (2001) (Apêndice 01).

Amostra do solo da área foi coletada e enviada para análise em laboratório. As características químicas e físicas do solo foram: pH em CaCl₂ de 5,6; 31,4 g dm⁻³ de matéria orgânica; P resina não significativo; V de 71,8%; teores de K, Ca, Mg e H+Al de 0,41; 5,76; 1,30 e 2,9 cmolc. dm⁻³, respectivamente; 475 g dm⁻³ de areia, 50 g dm⁻³ de silte e 475 g dm⁻³ de argila. Baseado na análise do solo as correções de fertilidade e acidez constituíram de 300 kg ha⁻¹ da formulação 09-30-10 na semeadura e três adubações de cobertura, sendo as duas primeiras com 160 kg ha⁻¹ e 140 kg ha⁻¹ da formulação 20-00-20 e a terceira 110 kg ha⁻¹ de ureia. A semeadura foi realizada com o cultivar TMG 47 B2RF não tolerante ao 2,4-D sal colina.

Cada parcela experimental foi composta por quatro linhas de cultivo, com oito metros de comprimento, espaçadas 0,9 m entre si, sendo a área útil constituída pelas duas linhas centrais descontando-se 0,5 m em cada extremidade da parcela. A aplicação das doses do herbicida foi realizada quando pelo menos 50% das plantas entraram no estágio fenológico correspondente ao objeto de estudo, com auxílio de pulverizador de pesquisa pressurizado a CO₂ contendo barra de pulverização munida por quatro pontas com indução de ar do tipo leque ADIA 110015, espaçadas 0,5 m entre si, distantes 0,5 m do alvo e calibrada a 1,8 kgf cm⁻², de modo a se obter consumo de calda equivalente a 150 L ha⁻¹.

Durante as aplicações, a velocidade do vento, a temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas por meio de uma estação meteorológica portátil, cujos valores

corresponderam, respectivamente, a 6,9 km h⁻¹; 28,6 °C e 78,6 % nas aplicações no estádio V4, 2,5 km h⁻¹; 27,4 °C e 65,5% nas aplicações no estádio B4 e 2,1 km h⁻¹; 27 °C e 61% nas aplicações no estádio C4.

O efeito dos tratamentos foi avaliado observando-se os sintomas visuais de injúria aos 3, 7, 14, 21 e 30 dias após as aplicações (DAA). Salienta-se que as avaliações visuais de 3, 7, 14 e 21 DAA serviram como parâmetro para a avaliação de 30 DAA. Quando a cultura entrou no estádio fenológico C6, foram escolhidas aleatoriamente 10 plantas por parcela para determinação das variáveis: altura das plantas e diâmetro do colo. No ponto de colheita, selecionou-se aleatoriamente 10 plantas por parcela para determinação do número de capulhos por planta. Foram então colhidos, de forma aleatória, 40 capulhos localizados no terço mediano das plantas, seguindo as recomendações de Belot & Dutra (2015).

Essas amostras foram beneficiadas, separando-se o caroço da pluma em máquinas de rolo com cinco facas, pelo Instituto Mato-grossense do Algodão (IMA), localizado em Primavera do Leste – MT. Com isso, foi possível determinar as variáveis: peso de 40 capulhos, peso da pluma de 40 capulhos, peso do caroço de 40 capulhos, rendimento de pluma e peso médio de um capulho.

As avaliações de produtividade foram realizadas na área útil de cada parcela experimental com o auxílio de um quadrado de plástico de 1,0 m x 1,8 m (respeitando o espaçamento de 0,9 m entre as linhas de cultivo e o arranjo das plantas), onde foram colhidos manualmente todos os capulhos das plantas. As amostras foram pesadas em balança de precisão de 0,01 grama.

Os valores obtidos para as variáveis citadas foram analisados pelo teste F e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico Rbio (BHERING, 2017). Quando significativos, testou-se o modelo de regressão de Brain & Cousens (1989), adaptado por Ritz et al. (2015), para análise do efeito de hormesis com o objetivo de descrever as curvas de dose-resposta com estímulo em baixas doses:

$$y = c + \frac{d - c + fx}{1 + \exp(b(\log(x) - \log(e)))}$$

onde y = produção do tratamento; x = dose do herbicida; e = ED50, que é definido como a dose que proporciona 50% do efeito total alcançável; d = limite superior; c = limite inferior; b = denota a inclinação relativa em torno de e ; f = termo linear. Os

modelos foram montados pelo software R Core Team (2016), e os gráficos foram plotados pelo programa Origin 8.5.1 SR1.

Para as variáveis que não apresentaram o efeito de hormesis, os dados foram ajustados ao modelo de regressão não-linear do tipo polinomial pelo programa Origin 8.5.1 SR1. Para escolha do modelo de regressão foi considerado o maior valor do coeficiente de determinação (R^2) a $p \leq 0,05$ de acordo com o teste F, respeitando-se a resposta biológica.

As amostras de pluma oriundas do beneficiamento foram enviadas para o laboratório da Cooperativa de Produtores de Algodão (UNNICOTTON), localizado em Primavera do Leste – MT, para análise da qualidade da fibra pelo equipamento HVI (High Volume Instruments). Determinou-se assim as características da fibra: SCI – Índice de consistência de fiação; UHM – Comprimento da fibra; UNF – Uniformidade de comprimento; SFI – Índice de fibras curtas; STR – Resistência da fibra; MIC – Índice micronaire; MAT – Maturidade; ELG – Alongamento da fibra; +b – Grau de amarelamento. Os valores obtidos foram analisados pelo teste F e os efeitos dos tratamentos foram comparados pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico Rbio (BHERING, 2017).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos visuais de injúria (%) aos 30 DAA foram superiores para o estágio fenológico V4 para todas as subdoses avaliadas, obtendo comportamento quadrático e ascendente chegando a 90% de injúria quando aplicado 68,4 g ea ha⁻¹ de 2,4-D sal colina (Figura 1). Salienta-se que as principais injúrias observadas nesse estágio foram epinastia e enrugamento das folhas jovens e do ápice caulinar principalmente em subdoses mais altas.

Para os estádios B4 e C4 também foi possível observar comportamento quadrático e ascendente, porém as injúrias foram de 55 e 65%, respectivamente, quando aplicado 68,4 g ea ha⁻¹ de 2,4-D sal colina (Figura 1). As principais injúrias observadas no estágio B4 foram epinastia, manchas foliares arroxeadas, engrossamento do colo das plantas e morte do ápice caulinar em subdoses mais elevadas. Para o estágio C4 as principais injúrias observadas foram ressecamento foliar e intenso arroxejamento das folhas.

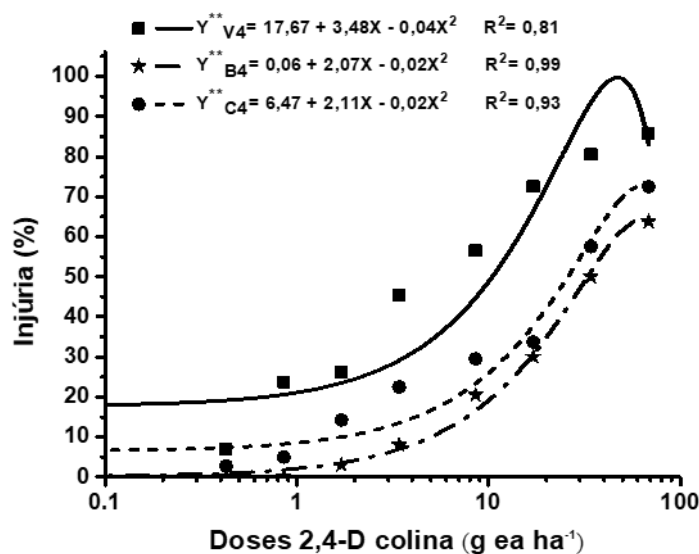


Figura 1 – Injúria visual (%) aos 30 DAA provocada por subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas em diferentes estádios fenológicos de plantas de algodoeiro herbáceo. ** Significativo ($p \leq 0,01$).

Com os resultados observados na Figura 1 pode-se inferir que os efeitos do 2,4-D sal colina são diretamente influenciados pela idade da planta. Doses baixas de 2,4-D em plantas sensíveis como o algodoeiro podem causar sintomas visuais que vão desde malformações foliares até epinastia severa e morte das plantas dependendo das condições ambientais, dose e principalmente do estágio de crescimento no momento da exposição por conta das diferenças de idade das folhas. A idade das folhas pode influenciar na absorção do herbicida através do desenvolvimento e maturidade da cutícula, visto que as folhas em desenvolvimento contêm ceras epicuticulares menos espessas e com composição química variável em comparação com folhas maduras (PETERSON et al., 2016).

Everitt & Keeling (2009) comentam que as estimativas visuais da lesão no início da temporada frequentemente superestimam as reduções de rendimento. O hábito de crescimento indeterminado do algodoeiro permite uma compensação considerável para o estresse e essa compensação depende do clima e de outras condições que podem variar, mesmo que a lesão no início da temporada tenha sido consistente, não sendo assim bom indicador de efeitos sobre a produtividade.

Subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 afetam negativamente a cultura do algodoeiro, visto que, o efeito de hormesis não foi significativo para as variáveis produtivas. Os valores de produtividade, peso de 40

capulhos, peso do caroço de 40 capulhos, peso da pluma de 40 capulhos, peso médio de um capulho, rendimento da fibra, altura e número de capulhos ajustaram-se ao modelo de regressão não-linear do tipo polinomial com comportamento descendente conforme aplicou-se as subdoses crescentes de 2,4-D sal colina (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de F, coeficientes de determinação e coeficientes das equações de regressão para análise das variáveis produtivas de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio V4.

Variável	F	R ²	Parâmetros da regressão Sem Hormesis		
			a	b	c
Produtividade (kg ha ⁻¹)	20,95**	0,8330	4412,07	-81,80	0,7268
Peso 40 cap. (g) ¹	17,39**	0,8038	167,66	-0,59	0,0054
Peso caroço (g)	50,47**	0,9252	92,63	-0,30	0,0027
Peso Pluma (g)	37,29**	0,9007	74,68	-0,25	0,0019
PM capulho (g) ²	35,54**	0,8962	4,19	-0,13	-0,0001
R. da pluma (%) ³	11,63**	0,7266	44,45	2,91	-0,0001
Altura (cm)	340,27**	0,9883	130,26	-2,24	0,0191
Nº de capulhos	69,70**	0,9449	16,52	-0,32	0,0027

**Significativo a 1% de probabilidade. 1-Peso de 40 capulhos; 2-Peso médio do capulho; 3-Rendimento da pluma.

De acordo com Oliveira et al. (2011), o herbicida 2,4-D interfere na divisão e alongação celular em virtude do desbalanço hormonal que promovem nas células, com o aumento da biossíntese de etileno, giberelinas, citocininas, e ácido abscísico (ABA). Esse desbalanço hormonal após aplicação do herbicida pode ocorrer durante toda a vida da planta podendo assim ocasionar a abscisão precoce de peças reprodutivas, principalmente se ocorrer contaminação nos primeiros estádios vegetativos.

Ao estudar o efeito de doses de 2,4-D sal amina nos parâmetros produtivos do algodoeiro, Sciumbato et al. (2014) afirmam que plantas de algodoeiro expostas a ao herbicida nos estádios fenológicos vegetativos V4 e V6 tendem a diminuir consideravelmente todos as variáveis produtivas da cultura. Os autores ainda comentam que doses superiores a 0,0053 kg i.a. ha⁻¹, quando aplicadas em ambos estádios, diminuíram significativamente a produção de capulhos por planta e o tamanho desses capulhos, podendo ser consideradas as principais variáveis que

foram responsáveis pela redução da produtividade do algodoeiro herbáceo, com reduções de até 52% na produção de pluma, corroborando aos resultados encontrados nessa pesquisa.

Subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio B4 do algodoeiro podem incrementar todas as variáveis produtivas da cultura, visto que, o modelo de hormesis foi significativo para estas variáveis, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,70. Nota-se também que para todas as variáveis avaliadas houve tendência das subdoses 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ apresentarem os valores máximos de hormesis em relação a testemunha sem aplicação do herbicida (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de F, coeficientes de determinação e coeficientes das equações de regressão para análise das variáveis produtivas de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio B4. Valores máximos de crescimento estimados e dose do herbicida para estes valores.

Variável	Parâmetros da regressão Com Hormesis						V. máx. ¹²		
	F	R ²	b	c	d	e	f	% da test. ¹⁰	Dose ¹¹
Prod. (kg ha ⁻¹) ¹	571,02**	0,98	13,55	489,92	4462,1	3,18	217,4	4,06	1,71
P. 40 cap. (g) ²	199,66**	0,96	3,27	123,62	149,31	2,13	21,09	11,18	0,855
P. car. (g) ³	206,57**	0,96	1,94	67,76	83,30	1,65	16,62	9,26	0,855
P. pluma (g) ⁴	283,97**	0,97	4,86	52,92	65,56	2,28	8,83	10,92	1,71
PM cap. (g) ⁵	283,23**	0,97	3,45	3,08	3,73	2,19	0,50	9,16	1,71
R. pluma (%) ⁶	21,93**	0,72	18,76	41,97	43,66	2,26	0,85	3,06	1,71
Altura (cm) ⁷	72,94**	0,89	0,95	392,98	127,04	1,64	-147,7	8,63	1,71
Nº de cap. ⁸	428,04**	0,98	1,87	3,12	14,62	2,13	5,45	11,44	0,855
D. colo (mm) ⁹	821,34**	0,99	-2,65	15,88	34,28	23,2	-0,15	64,31	34,2

**Significativo a 1% de probabilidade. 1-Produtividade; 2-Peso 40 capulhos; 3-Peso do caroço; 4-Peso da pluma; 5-Peso médio do capulho; 6-Rendimento da fibra; 7-Altura; 8-Número de capulhos; 9-Diâmetro 10-% da testemunha; 11-(g ea ha⁻¹); 12-Valores Máximos.

Destaca-se que houve ajuste do modelo de hormesis para a variável diâmetro do colo, todavia esse efeito foi avaliado como injúria das aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina e não um incremento benéfico como para as demais variáveis. Segundo Guevara (1998), o engrossamento do colo das plantas é uma das injúrias

mais características de contaminação de doses elevadas de 2,4-D em algodoeiro em estádios reprodutivos. O autor ainda comenta que esse sintoma é prejudicial as plantas, uma vez que ocasiona o efeito de “estrangulamento” dos vasos condutores, acarretando em nanismo ou até morte das plantas contaminadas. Neste estudo a segunda maior subdose, 34,2 g ea ha⁻¹, apresentou o valor máximo em relação a testemunha para esta variável.

A curva de regressão representando a produtividade de algodão em caroço de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4 (Figura 2) apresentou coeficiente de determinação superior a 0,98, evidenciando assim o bom ajuste do modelo de hormesis para essa variável. O valor máximo da produtividade foi estimado para a subdose de 1,71 g ea ha⁻¹, em que o valor máximo percentual em relação à testemunha foi de 4,06%.

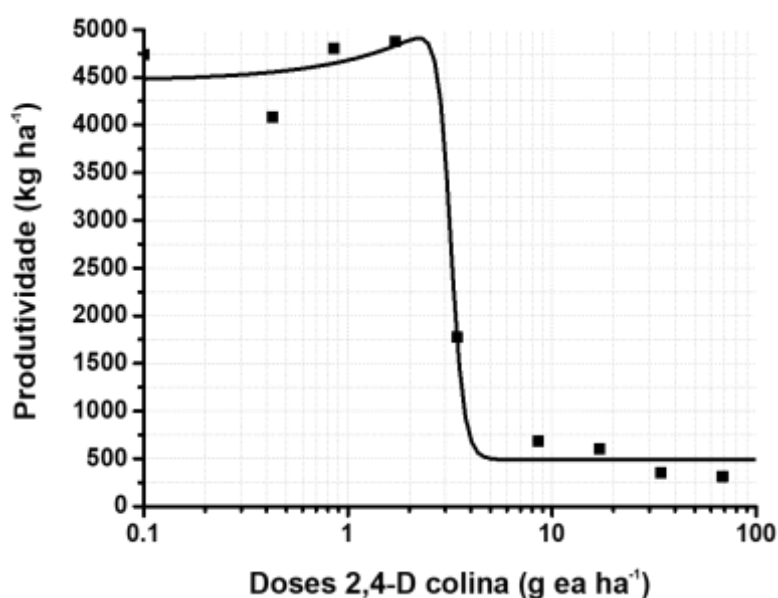


Figura 2 – Curva representando a produtividade de algodão em caroço de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4.

As curvas representando o peso de 40 capulhos (Figura 3 A), peso do caroço de 40 capulhos (Figura 3 B), peso da pluma de 40 capulhos (Figura 3 C), altura das plantas (Figura 3 D), rendimento de pluma (Figura 3 E) e número de capulhos por planta (Figura 3 F) de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4 apresentaram R² de 0,96; 0,96; 0,97; 0,89; 0,72 e 0,98, respectivamente, que também evidenciou o bom ajuste do modelo de hormesis para essas variáveis.

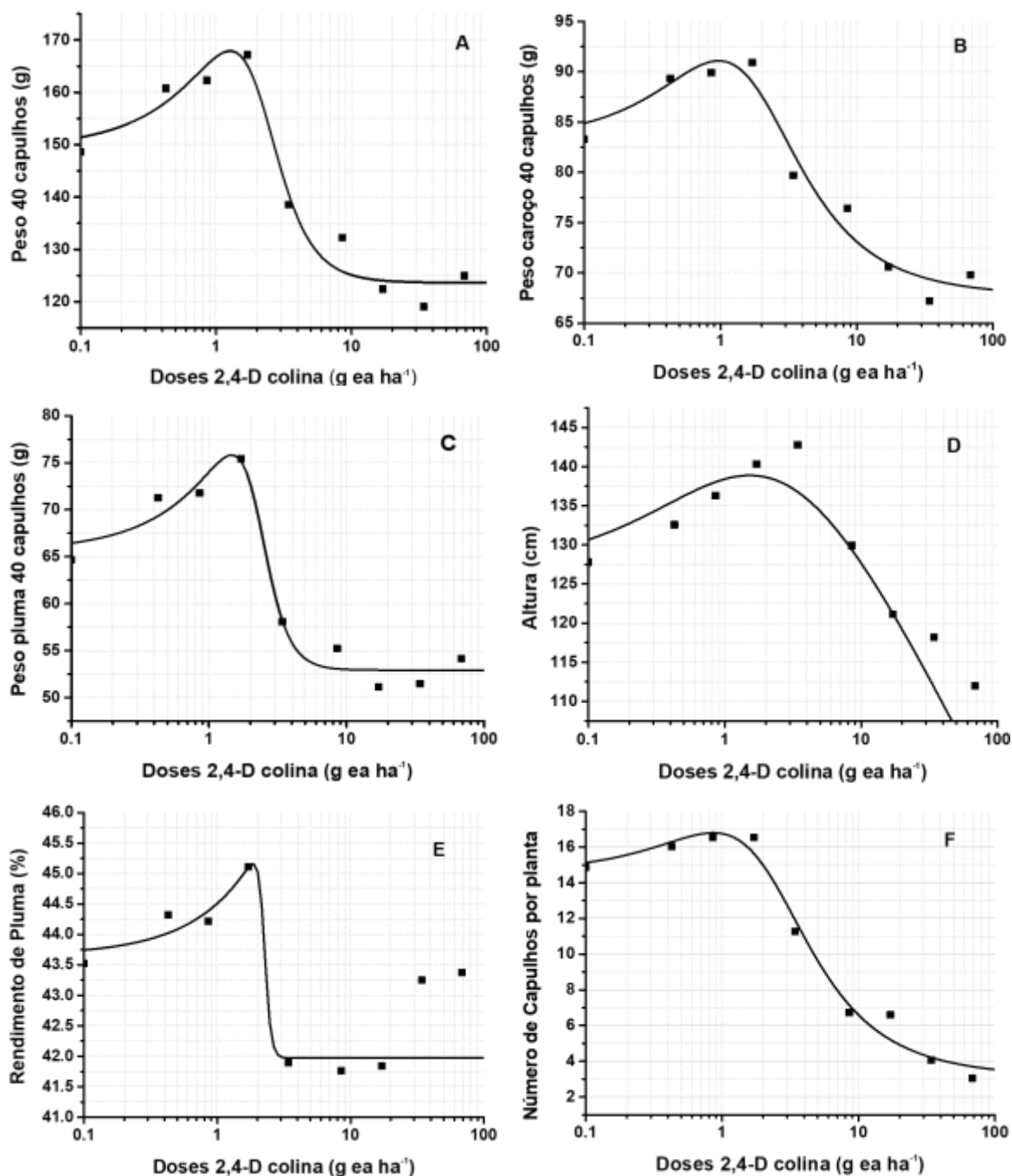


Figura 3 – Curvas representando o peso de 40 capulhos (A), peso do caroço (B), peso da pluma (C), peso médio do capulho (D), rendimento de pluma (E), e número de capulhos por planta (F) de algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em estágio B4.

Os valores máximos do peso de 40 capulhos, peso do caroço de 40 capulhos e número de capulhos por planta foram estimados para a subdose de 0,855 g ea ha⁻¹, em que os valores máximos percentuais em relação à testemunha estiveram entre

9 e 11%. Para as demais variáveis avaliadas na Figura 3 os valores máximos foram estimados para a subdose de 1,71 g ea ha⁻¹, apresentando os valores máximos em relação à testemunha entre 9 e 10%, exceto para rendimento da pluma com 3,06%.

Acrescenta-se que o efeito de hormesis para essas variáveis produtivas contribuiu para o incremento na produtividade observado na Figura 2. Pode-se assim considerar uma segurança aparente caso haja contaminações de subdoses de 2,4-D sal colina entre 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ em algodoeiro no estágio B4. Na pesquisa de Brito et al. (2018), os autores afirmam que no caso dos vegetais a reação para compensar um estresse químico pode estar relacionada a um maior acúmulo de matéria seca e fresca, tanto da parte aérea quanto radicular, maior produção de sementes por planta, acarretando em maior produtividade.

Calabrese & Mattson (2017), acrescentam que o termo hormesis refere-se a respostas adaptativas para moderar condições de estresse dos quais o sistema melhora sua funcionalidade e/ou tolerância a desafios mais severos podendo considerar que substâncias tóxicas podem ser estimulantes em doses baixas. Seguindo este contexto, neste estudo foi possível notar que os efeitos visuais de injúria mostraram que aos primeiros 30 DAA todas as subdoses de 2,4-D sal colina ocasionaram danos as plantas de algodoeiro em estágio B4. Mesmo assim observou-se que algumas subdoses estimularam as plantas a compensar o estresse causado, conferindo incremento na produtividade e confirmando a teoria de hormesis para aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina em algodoeiro.

No trabalho de Américo et al. (2017), ao avaliarem a produtividade de algodoeiro em função da aplicação de subdoses de 2,4-D sal amina e cloreto de mepiquat, os autores observaram que a subdose 2,45 g ea ha⁻¹ aplicadas no estágio B4 proporcionam incremento no número de estruturas reprodutivas. A aplicação de 1,75 g ea ha⁻¹ de 2,4-D propiciou aumento de produtividade de algodão em caroço, corroborando aos dados encontrados neste estudo.

Subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no estágio C4 do algodoeiro não afetaram as variáveis produtivas da cultura, visto que não houve diferença significativa entre os tratamentos e a testemunha para nenhuma das variáveis estudadas (Tabela 3). Conforme exposto anteriormente o herbicida 2,4-D sal colina atuou como dessecante quando aplicado em estágio C4, sendo que a principal injúria observada foi o intenso ressecamento das folhas.

Constantin et al. (2007) afirmam que aplicações do herbicida 2,4-D até o estágio C1 podem afetar de forma significativa a produtividade de algodão em caroço, que é ocasionado principalmente em função da queda de botões florais. A partir do estágio C3/C4, o algodão suportou derivas de 2,4-D de até 13,44 g ea ha⁻¹ sem ter sua produtividade comprometida. Dessa forma, a partir do momento em que os capulhos começam a se formar, a sensibilidade da cultura ao 2,4-D cai substancialmente.

Tabela 3 – Resumo da análise de variância das variáveis produtivas de algodoeiro submetido a aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina no estágio C4.

	Variável								
	Prod. ¹ (kg ha ⁻¹)	P40 ²	PC ³	PP ⁴	PMC ⁵	RP ⁶ (%)	H ⁷ (cm)	NC ⁸	D ⁹ (mm)
Média	4644,08	166,83	92,23	73,89	4,17	44,29	129,04	16,05	15,20
F Doses	1,20 ^{NS}	0,49 ^{NS}	0,56 ^{NS}	0,63 ^{NS}	1,52 ^{NS}	0,51 ^{NS}	1,59 ^{NS}	0,68 ^{NS}	1,23 ^{NS}
F Blocos	4,68 ^{**}	0,22 ^{NS}	0,36 ^{NS}	0,74 ^{NS}	5,99 ^{**}	0,20 ^{NS}	2,85 ^{NS}	1,74 ^{NS}	3,14 [*]
CV (%)	13,78	4,73	4,75	5,26	1,37	4,72	7,02	10,88	3,93

NS – Não significativo; ** Significativo a 1% de probabilidade; * Significativo a 5% de probabilidade. /1- Produtividade; /2-Peso 40 capulhos; /3-Peso do caroço; /4-Peso da pluma; 5/-Peso médio do capulho; 6/-Rendimento da fibra;7/-Altura; 8/-Número de capulhos; 9/-Diâmetro.

Avaliando as características analisadas pelo equipamento HVI (High Volume Instruments) da fibra de algodoeiro em função da aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina e dos estádios fenológicos (Tabela 4), observa-se que todas as subdoses do herbicida 2,4-D sal colina aplicadas no três estádios avaliados não afetaram as variáveis de qualidade da fibra, visto que não houve diferença significativa entre os tratamentos e a testemunha para o fator doses. Para o fator estágio fenológico, houve diferença significativa para as variáveis STR, ELG e +b, indicando que a idade das plantas de algodoeiro submetidas a aplicações de 2,4-D sal colina pode influenciar na qualidade da fibra do algodoeiro (Tabela 4).

Tabela 4. Características da fibra de algodoeiro em função da aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina e dos estádios fenológicos.

Características									
Estádio	SCI			UHM (mm)			UNF (%)		
	V4	B4	C4	V4	B4	C4	V4	B4	C4
Média	141,25	144,36	144,44	30,22	30,22	30,22	82,95	83,31	83,35
F Doses (D)		0,82 ^{NS}			0,80 ^{NS}			1,43 ^{NS}	
F Estádio (E)		1,63 ^{NS}			0,06 ^{NS}			1,44 ^{NS}	
F (D x E)		1,35 ^{NS}			1,25 ^{NS}			1,04 ^{NS}	
F Blocos		1,77 ^{NS}			3,32 [*]			1,50 ^{NS}	
CV (%)		5,96			2,23			1,34	

Características									
Estádio	SFI (%)			STR (gf tex ⁻¹)			MIC (µg pol ⁻¹)		
	V4	B4	C4	V4	B4	C4	V4	B4	C4
Média	8,26	8,16	8,08	29,1 b	29,6 a	29,8 a	4,11	4,10	4,17
F Doses (D)		0,97 ^{NS}			0,75 ^{NS}			1,32 ^{NS}	
F Estádio (E)		0,19 ^{NS}			4,07 [*]			1,11 ^{NS}	
F (D x E)		1,24 ^{NS}			1,65 ^{NS}			0,61 ^{NS}	
F Blocos		2,37 ^{NS}			2,95 [*]			0,69 ^{NS}	
CV (%)		14,51			3,91			5,39	

Características									
Estádio	MAT (%)			ELG (%)			+b		
	V4	B4	C4	V4	B4	C4	V4	B4	C4
Média	85,63	85,80	85,75	6,29 b	6,20 b	6,52 a	6,36 a	6,47 a	6,18 b
F Doses (D)		1,28 ^{NS}			1,30 ^{NS}			1,83 ^{NS}	
F Estádio (E)		0,76 ^{NS}			5,89 [*]			6,42 [*]	
F (D x E)		0,45 ^{NS}			1,15 ^{NS}			1,27 ^{NS}	
F Blocos		0,39 ^{NS}			0,54 ^{NS}			3,14 [*]	
CV (%)		0,68			6,41			5,38	

NS – Não significativo; * Significativo a 5% de probabilidade. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. SCI – Índice de consistência de fiação; UHM – Comprimento da fibra; UNF – Uniformidade de comprimento; SFI – Índice de fibras curtas; STR – Resistência da fibra; MIC – Índice micronaire; MAT – Maturidade; ELG – Alongamento da fibra; +b – Grau de amarelamento.

Para a variável índice de consistência da fiação (SCI) não foram observadas diferenças significativas entre os estádios fenológicos, todavia é importante destacar que o estágio V4 apresentou valores inferiores aos demais estádios. Este fato é importante para entender o comportamento das demais variáveis, visto que o índice

de consistência da fiação é o valor determinado por uma equação matemática de regressão múltipla desenvolvida a partir da relação entre as propriedades físicas mais importantes das fibras. Entende-se que quanto menor o valor do SCI, menor é o poder de consistência da fibra, que obterá fios menos resistentes.

Avaliando o comprimento das fibras (UHM), observa-se que, independente das subdoses de 2,4-D sal colina e dos estádios fenológicos, as fibras apresentaram comprimento médio de 30,22 mm. Fibras de algodão com comprimento superior a 30 mm são consideradas longas (VAN DER SLUIJIS et al., 2015). O comprimento de fibra exerce grande importância no limite do índice de fiabilidade e na regularidade da distribuição das fibras no fio e tem efeito direto na resistência da fibra. Fibras mais longas são preferidas pela indústria, devido serem mais fortes e mais finas para a fiação (JERONIMO et al., 2014).

Os valores obtidos neste estudo para a variável índice de fibras curtas (SFI) classificam-se na categoria de fibra curta com conteúdo “médio”, por ser superior a 6 e inferior a 9% (FONSECA & SANTANA, 2002). Entende-se que quanto menor for este índice, melhor será a qualidade tecnológica da fibra (ZONTA et al., 2017). Levando este fato em consideração, nota-se que mesmo não havendo diferença significativa entre os estádios fenológicos, houve tendência do valor médio do índice de fibras curtas do estádio V4 ser maior que dos demais estádios, evidenciando que possíveis contaminações de 2,4-D sal colina neste estádio podem comprometer a qualidade das fibras.

Alguns estudos têm mostrado que a resistência da fibra (STR) pode ser considerada como a variável mais responsiva as condições adversas do ambiente, visto que situações de estresse comprometem diretamente essa variável qualitativa da fibra de algodão (TANG et al., 2015). A resistência da fibra é avaliada medindo a capacidade que a fibra possui de suportar uma carga até romper-se, expressa em gf tex^{-1} , representando a força máxima para romper um feixe de fibras, sendo que o mínimo de resistência desejado pela indústria têxtil é de $29,5 \text{ gf tex}^{-1}$ (GAMA et al., 2017). Neste estudo os valores de STR para os estádios B4 e C4 submetidos a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina foram superiores a esse valor. Porém salienta-se que houve diferença significativa entre estes estádios e o estádio V4 que apresentou $29,1 \text{ gf tex}^{-1}$. Com isso, infere-se que a aplicação de subdoses do herbicida nesse estádio diminuiu a qualidade das fibras de algodoeiro, uma vez que a STR foi inferior ao valor desejado.

Neste estudo os valores de micronaire, independente das subdoses de 2,4-D sal colina e do estágio fenológico do algodoeiro, podem ser considerados médios e de boa qualidade para a indústria. O índice micronaire é importante para a comercialização da qualidade da fibra, e é sugerido que esse índice esteja entre 3,5 e 5,0 para a melhor incorporação de corantes durante o acabamento (KLJUN et al., 2014).

Os valores de maturidade das fibras (MAT) não diferenciaram entre si em função dos estádios fenológicos do algodoeiro submetido a aplicações de 2,4-D sal colina, salientando que os valores estiveram acima de 85%. A maturação de fibras é um parâmetro importante para a indústria têxtil, uma vez que as fibras imaturas têm menor capacidade de absorção de tinta, tornando o tecido não uniforme. Considera-se que fibras que apresentam valores superiores a 80% de maturidade são consideradas maduras (LEE & FANG 2015).

O alongamento da fibra (ELG) permite avaliar o comportamento elástico do material têxtil submetido a um esforço de tração, proporcionando uma ideia sobre a fiabilidade esperada. Os valores de alongamento da fibra observados neste estudo podem ser classificados como regular (6,0 a 6,9%) (FONSECA & SANTANA, 2002). Porém destaca-se que houve diferença estatística entre os estádios fenológicos, evidenciando que aplicações do herbicida 2,4-D sal colina aplicado nos estádios V4 e B4 comprometem o alongamento das fibras.

Neste estudo foi possível observar diferença significativa entre os estádios do algodoeiro submetido a aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina para a variável +b. Portanto ficou evidente que contaminações do herbicida nos estádios V4 e B4 influenciam na cor e conseqüentemente na qualidade da fibra, visto que os valores foram superiores ao estágio C4, indicando assim fibras com coloração mais amarelada. O índice de amarelecimento (+b) indica a cor da fibra, que deve ser a mais branca possível, sendo que valores mais altos tendem ao amarelo e valores mais baixos tendem ao branco. Assim, um maior índice +b, pode implicar em fibra ligeiramente amarelada, considerada como de qualidade inferior (SILVA et al., 2016).

Todos os fatores apresentados acima explicam os resultados obtidos neste estudo, uma vez que aplicações de subdoses de 2,4-D sal colina aplicadas no estágio V4 do algodoeiro afetam todas as variáveis produtivas da cultura e influenciam diretamente a qualidade da fibra de algodão, evidenciando que contaminações do

herbicida nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas comprometem drasticamente a lavoura.

Quando essas subdoses foram aplicadas no estágio B4 da cultura observou-se efeito de hormesis para todas as variáveis de produção além de não ter sido observado influencia nas variáveis qualitativas da fibra, comprovando que existe uma segurança aparente caso haja contaminações de algumas dessas subdoses na cultura do algodoeiro nesse estágio fenológico. As variáveis produtivas e de qualidade da fibra de plantas de algodoeiro no estágio C4 não foram influenciadas pela aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina, provando que a idade avançada das plantas influencia diretamente os efeitos do herbicida, não havendo riscos caso ocorra contaminações acidentais neste estágio.

3.4. CONCLUSÕES

Os efeitos do 2,4-D sal colina são influenciados pela idade da planta.

Quando aplicadas no estágio V4, as subdoses do herbicida 2,4-D sal colina afetam os parâmetros produtivos do algodoeiro.

As subdoses 0,855 e 1,71 g ea ha⁻¹ do herbicida 2,4-D promovem hormesis para todas as variáveis produtivas de algodoeiro em estágio B4.

Plantas de algodoeiro em estágio C4 não são afetadas pela aplicação de subdoses de 2,4-D sal colina.

As variáveis qualitativas da fibra de algodão não são afetadas pela exposição ao herbicida. A idade das plantas de algodoeiro submetidas a aplicações de 2,4-D sal colina pode influenciar na qualidade da fibra, havendo diferença significativa para as variáveis STR, ELG e +b.

3.5. REFERÊNCIAS

AMERICO, G. H. P.; AMERICO-PINHEIRO, J. H. P.; FURLANI JR, E. Hormesis Effect of Dichlorophenoxy Acetic Acid Sub-Doses and Mepiquat Chloride on Cotton Plant. **Planta Daninha**, v. 35, 2017.

- BELZ, R. G.; FAROOQ, M. B.; WAGNER, J. Does selective hormesis impact herbicide resistance evolution in weeds? ACCase-resistant populations of *Alopecurus myosuroides* Huds. as a case study. **Pest management science**, 2018.
- BHERING, L.L. RBIO: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17: 187-190p, 2017.
- BRAIN, P.; COUSENS, R. An equation to describe dose responses where there is stimulation of growth at low doses. **Weed Research**, v. 29, n. 2, p. 93-96, 1989.
- BRITO, I. P. F. S et al. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018.
- BYRD, S. A. et al. Cotton stage of growth determines sensitivity to 2, 4-D. **Weed technology**, v. 30, n. 3, p. 601-610, 2016.
- CALABRESE, E. J.; MATTSON, M. P. How does hormesis impact biology, toxicology, and medicine? **NPJ Aging and Mechanisms of Disease**, v. 3, n. 1, p. 13, 2017.
- CEDERGREEN, N.; RITZ, J. C.; STREIBIG, B. Improved empirical models describing hormesis. **Environment Toxicology Chemical**, v. 24, p. 3166-3172, 2005.
- CONSTANTIN, J. et al. Efeito de subdoses de 2,4-D na produtividade do algodão e suscetibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 24-29, 2007.
- EGAN, J. F.; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A meta-analysis on the effects of 2,4-D and dicamba drift on soybean and cotton. **Weed Sciences**, v. 62, p. 193-206, 2014.
- EVERITT, J. D.; KEELING, J. Wayne. Cotton growth and yield response to simulated 2, 4-D and dicamba drift. **Weed Technology**, v. 23, n. 4, p. 503-506, 2009.
- FONSECA, R. G.; SANTANA, J. C. F. de. Resultados de ensaio HVI e suas Interpretações (ASTM D-4605). Campina Grande: **Embrapa Algodão**, 2002. 13p. Circular Técnica, 66.
- GAMA, J. S. N. et al. Efeito da adubação silicatada na qualidade da fibra do algodoeiro. **MAGISTRA**, v. 28, n. 2, p. 244-253, 2017.
- GUEVARA, G. **Efecto del 2,4-D sobre el algodón**. Saenz Peña: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária. 1998. 12 p. (Boletim Técnico, 12).
- JERÔNIMO, J. F. et al. Characterization of quality of seed and cotton fiber of a 25 saw ginner. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 664-671, 2014.
- KLJUN, A. et al. Analysis of the physical properties of developing cotton fibres. **European Polymer Journal**, v. 51, p. 57-68, 2014.
- LEE, J. A.; FANG, D. D. Cotton as a world crop: origin, history, and current status. **Cotton**, n. 57, p. 1-24, 2015.
- MARCHI, S. R. et al. Weeds alter the establishment of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 5, n. 2, p. 85-93, 2017.

MARUR, C. J. L.; RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista De Oleaginosas E Fibrosas**, v. 5, n. 2, p. 313-317, 2001.

MOTA, A. A. B. **Espectro de gotas e potencial de deriva de caldas contendo o herbicida 2,4-D amina em misturas em tanque**. 2015. 69f Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

OIVEIRA, D. P. et al. Alterações morfológicas na cultura do algodão provocada por subdoses de 2, 4-D na fase inicial de desenvolvimento da cultura. **Revista Cultivando o Saber**, v. 8, n. 4, p. 414-426, 2015.

OLIVEIRA JR, R. S. Mecanismos de ação de herbicidas – In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. 2011, p. 141-148.

PETERSON, M. A. et al. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2016. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

RITZ, C. et al. Dose-Response Analysis Using R. **PLoS ONE**, v. 10, n. 12, 2015.

SCIUMBATO, A. S. et al. The effect of 2, 4-D drift rates on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growth and yield. **Plant Health Progress**, v. 15, n. 2, p. 67-73, 2014.

SILVA, R. A. et al. Biostimulants on mineral nutrition and fiber quality of cotton crop. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 12, p. 1062-1066, 2016.

SOSNOSKIE, L. M. et al. Evaluating the volatility of three formulations of 2,4-d when applied in the field. **Weed Technology**, v.29, n. 2, p. 177-184, 2015.

TANG, S. et al. Construction of genetic map and QTL analysis of fiber quality traits for Upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Euphytica**, v. 201, n. 2, p. 195-213, 2015.

VAN DER SLUIJS, M. H. J.; LONG, R. L.; BANGE, M. P. Comparing cotton fiber quality from conventional and round module harvesting methods. **Textile Research Journal**, v. 85, n. 9, p. 987-997, 2015.

VELINI, E. D. et al. Growth regulation and other secondary effects of herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 3, p. 351-354, 2010.

VELINI, E. D. et al. Variations in Pesticide Doses under Field Conditions. **ACS Symposium Series**, v.1249, p. 47-60, 2017.

ZONTA, J. H. et al. Influence of boll sampling method and water stress on fiber quality of irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 34, p. 2667-2674, 2017.

ZONTA, J. H. et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 6, p. 595-602, 2014.

4.0 APÊNDICE 01

Citação do Artigo:

UM SISTEMA DE REFERÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DE ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DE ALGODOEIRO HERBÁCEO

Celso Jamil Marur e Onaur Ruano

Os estádios de crescimento e desenvolvimento serão caracterizados basicamente em função de suas fases fenológicas, ou seja, vegetativa (V), formação de botões florais (B), abertura da flor (F) e abertura do capulho (C).

No período vegetativo, entre a emergência da plântula e até que a primeira folha verdadeira tenha o comprimento de 2,5 centímetros de nervura principal, o estágio será V0. A partir do limite anterior e até que a segunda folha verdadeira tenha a sua nervura principal com comprimento de 2,5 centímetros, o estágio será V1. Sucessivamente, aplicando o mesmo critério, a planta avançará para os estádios V2, V3, V4, V5 etc. Nesta fase, considera-se folha verdadeira expandida quando a nervura principal de seu limbo foliar for maior que 2,5 centímetros.

No início da fase reprodutiva, ou seja, quando o primeiro botão floral estiver visível, o estágio passa a ser B1. Quando o primeiro botão floral do terceiro ramo reprodutivo estiver visível, a planta estará no estágio B3. Neste momento, estará sendo formado, também, o segundo botão floral no primeiro ramo frutífero. Sucessivamente, à medida que o primeiro botão floral de um novo ramo frutífero estiver visível, o estágio passará a ser Bn.

A indicação B não será mais utilizada a partir do momento em que o primeiro botão floral do primeiro ramo frutífero se transformar em flor. A partir de então, o estágio de desenvolvimento passará a ser F1.

Quando a primeira maçã do primeiro ramo se transformar em capulho o estágio de desenvolvimento passará a ser C1. Sucessivamente, o estágio será Cn à medida que ocorrer a abertura da primeira maçã do ramo frutífero de número n.