



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AGRÍCOLA**



**TESE**

---

**ECOFISIOLOGIA DE GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT  
HÍDRICO E APLICAÇÃO DE ÁCIDO PIRÚVICO**

---

**FRANCISCO DE ASSIS DA SILVA**

Campina Grande - Paraíba

Julho de 2022

FRANCISCO DE ASSIS DA SILVA

Engenheiro agrônomo

**ECOFISIOLOGIA DE GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT  
HÍDRICO E APLICAÇÃO DE ÁCIDO PIRÚVICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

**Orientadores:** Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes

Prof.<sup>a</sup> Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos

Campina Grande - Paraíba

Julho de 2022

S586e Silva, Francisco de Assis da.  
Ecofisiologia de genótipos de algodoeiro sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico / Francisco de Assis da Silva. – Campina Grande, 2022.  
100 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.  
"Orientação: Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes, Profa. Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos".

Referências.

1. Algodão – Cultura. 2. Algodão (*Gossypium hirsutum* L.). 3. Trocas Gasosas. 4. Eficiência Fotoquímica. 5. Manejo da Água. 6. Biotecnologia. I. Fernandes, Pedro Dantas. II. Santos, Roseane Cavalcanti dos. III. Título.

CDU 633.511(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE**

**FRANCISCO DE ASSIS DA SILVA**

**ECOFISIOLOGIA DE GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT  
HÍDRICO E APLICAÇÃO DE ÁCIDO PIRÚVICO**

**BANCA EXAMINADORA**

**PARECER**

---

Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes – Orientador  
UAEA/CTRN/UFPA

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos – Orientadora  
EMBRAPA- ALGODÃO

---

Prof. Dr. José Dantas Neto - Examinador Interno  
UAEA/CTRN/UFPA

---

Prof. Dr. Ronaldo do Nascimento - Examinador Interno  
UAGRA/CCTA/UFPA

---

Prof<sup>a</sup>. Lauriane Almeida dos Anjos Soares - Examinadora Externa  
UAGRA/CCTA/UFPA

---

Dr. Leandro de Pádua Souza– Examinador Externo  
UAST/UFRRPE

---

Dr. Rennan Fernandes Pereira - Examinador Externo  
EMBRAPA-ALGODÃO

Campina Grande – Paraíba,  
Julho de 2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

#### **ATA DE DEFESA DE TESE PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 29 DE JUNHO DE 2022.**

CANDIDATO(A): **FRANCISCO DE ASSIS DA SILVA**

**COMISSÃO EXAMINADORA:** Pedro Dantas Fernandes - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Roseane Cavalcanti dos Santos - Orientador(a) Embrapa Algodão; José Dantas Neto - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Ronaldo do Nascimento- Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG; Lauriane Almeida dos Anjos Soares - Examinador(a) Externo(a) - CCTA/UFCG; Leandro de Pádua Souza - Examinador(a) Externo(a) - UAST/UFRPE; Rennan Fernandes Pereira- Examinador(a) Externo(a) - Embrapa Algodão/FUNDAPER (PORTARIA PPGEA - DT 09/2022)

**TÍTULO: ECOFISIOLOGIA DE GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E APLICAÇÃO DE ÁCIDO PIRÚVICO.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Irrigação e Drenagem

**LOCAL:** Por Videoconferência (plataforma Google Meet)

**HORÁRIO:** às 14h

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Tese, sendo **APROVADO(A)**, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por JOSIVANDA PALMEIRA GOMES (Coordenadora do PPGEA) e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 29 de junho de 2022.

JOSIVANDA PALMEIRA GOMES - Coordenadora do PPGEA/UFCG

Pedro Dantas Fernandes - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Roseane Cavalcanti dos Santos - Orientador(a) Embrapa Algodão

José Dantas Neto - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Ronaldo do Nascimento- Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG





## **DEDICATÓRIA**

A Deus, Ser Onipotente, ao qual rendo graças.

Ao meu irmão, Damião Rodriguês da Silva (*In memoriam*).

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, sobre todas as coisas, pela sua infinita bondade em agraciar-me com sabedoria, discernimento e saúde.

A minha mãe, Maria do Socorro, meus irmãos, Heleno, Helenilda e a minha vó Maria da Glória, por serem alicerce nos projetos o quais resolvi seguir.

Ao meu orientador, prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes, pela orientação, dedicação, amizade, ensinamentos e conselhos, além da vida acadêmica, contribuindo para o engrandecimento pessoal e profissional.

A minha segunda orientadora, prof<sup>ª</sup> Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos, pela orientação e acolhimento durante a execução da pesquisa na Embrapa Algodão.

Aos examinadores, prof<sup>ª</sup> Dra. Lauriane Almeida dos Anjos Soares, prof. Dr. José Dantas Neto, prof. Dr. Ronaldo do Nascimento, ao Dr. Leandro de Pádua Souza e ao Dr. Rennan Fernandes Pereira por contribuírem na melhoria deste trabalho.

A todos os professores do PPGEA, área de Irrigação e Drenagem, por todo ensinamento durante o curso de doutorado.

Aos amigos de caminhada, pela amizade e companheirismo nesses últimos quatro anos. Em especial, a Mirandy dos Santos Dias, que se tornou mais que um amigo, um irmão que a vida me presenteou, agradeço pela parceria desde os primeiros minutos em que cheguei a Campina Grande.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão, pelo espaço concedido para realização da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Cappes, pela concessão da bolsa de estudo a qual foi de fundamental importância para realização deste curso.



*“Eu sou o que posso, na medida em que me permitem.  
Quando posso Eu ultrapasso as fronteiras... Quando  
não posso, do meu limite faço arte. Sou semelhante  
ao rio. Se me barram, Eu aprofundo” (Pe. Fabio de  
Melo)*

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

- Figura 1. Dados climáticos da casa de vegetação durante a condução do experimento..... 34
- Figura 2. Dados médios para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) de algodoeiros em função dos tratamentos aos 22 DAE..... 39
- Figura 3. Dados médios para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) de plantas de algodão em função dos genótipos aos 22 DAE..... 41
- Figura 4. Desdobramento da interação para fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) em plantas de algodoeiros em função do genótipo e dos tratamentos aplicados ao 22 DAE..... 43
- Figura 5. Desdobramento da interação para número de capulhos ( $N_{cap}$ ), massa de capulhos por plantas ( $M_{cap}$ ) e produção de algodão em caroço ( $P_{ac}$ ) de algodoeiros em função do genótipo e dos tratamentos aos 120 DAE..... 46
- Figura 6. Produtividade da água ( $Y_w$ ) de algodoeiro em função dos tratamentos (A) e dos genótipos (B). ..... 49

### CAPÍTULO III

- Figura 1. Dados climáticos da casa de vegetação durante a condução do experimento..... 59

Figura 2.	Desdobramento da interação para condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ) de plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAE.....	65
Figura 3.	Dados médios para concentração interna de CO <sub>2</sub> ( $C_i$ ), taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> ( $A$ ) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) de plantas de algodão em função dos tratamentos (A, B e C) e dos genótipos (D, E e F) aos 35 DAE.....	66
Figura 4.	Desdobramento da interação para eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) de plantas de algodão em função dos genótipos e dos tratamentos aos 35 DAS.....	67
Figura 5.	Altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH) e área foliar de plantas de algodão em função dos tratamentos (A, B, C e D) e dos genótipos (E, F, G e H) aos 35 DAE.....	70
Figura 6.	Desdobramento da interação para número de capulhos por planta (Ncap), massa de capulho por planta (Mcap) e produção de algodão em caroço (Pac) de plantas de algodoeiros em função dos genótipos e dos tratamentos aos 120 DAE.....	72
Figura 7.	Produtividade da água ( $Y_w$ ) de algodoeiro em função dos tratamentos (A) e dos genótipos (B) .....	74

#### CAPÍTULO IV

Figura 1.	Dados climáticos durante a casa de vegetação durante a condução do experimento.....	83
Figura 2	Projeção bidimensional (Biplot) dos tratamentos (A) e correlação de variáveis (B) de genótipos de algodão sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico nos dois primeiros Componentes principais (CP <sub>1</sub> e CP <sub>2</sub> ) .....	97

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO II

Tabela 1.	Atributos físico e químicos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCEG), Campina Grande, PB.....	35
Tabela 2.	Umidade do solo de cada tratamento ao final do déficit hídrico na fase de vegetativa aos 25 DAE.....	36
Tabela 3.	Resumo da análise de variância para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de $CO_2$ ( $C_i$ ), taxa de assimilação de $CO_2$ ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) em plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 25 DAE.....	38
Tabela 4.	Resumo da análise de variância para fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) de plantas de algodão em função dos genótipos e dos tratamentos aos 25 DAE.....	42
Tabela 5.	Resumo da análise de variância para número de capulhos por planta ( $N_{cap}$ ), massa de capulhos por planta ( $M_{cap}$ ), produção de algodão em caroço ( $P_{ac}$ ) e produtividade da água ( $Y_w$ ) de plantas de algodão em função dos genótipos e dos tratamentos aos 120 DAE.....	45
Tabela 6	Matriz de correlação entre as variáveis .....	50

### CAPÍTULO III

Tabela 1.	Atributos físico e químicos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCEG), Campina Grande, PB.....	60
Tabela 2.	Umidade do solo de cada tratamento ao final do déficit hídrico na fase de vegetativa aos 35 DAE.....	60
Tabela 3.	Resumo da análise de variância do teste F para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de $CO_2$	

	( <i>C<sub>i</sub></i> ), taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> ( <i>A</i> ), eficiência instantânea da carboxilação ( <i>A/C<sub>i</sub></i> ) e eficiência intrínseca do uso da água ( <i>A/g<sub>s</sub></i> ) em plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAE.....	63
Tabela 4.	Resumo da análise de variância do teste F para altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH), área foliar (AF), número de capulhos (Ncap), massa de capulhos (Mcap), produção (Prod) e produtividade da água ( <i>y</i> ) em plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAE.....	69
Tabela 5	Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis .....	75

#### CAPÍTULO IV

Tabela 1.	Atributos físico e químicos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCG), Campina Grande, PB.....	84
Tabela 2.	Umidade do solo em cada tratamento ao final do período de restrição hídrica na fase de vegetativa e florescimento aos 25 e 35 DAE, respectivamente.....	85
Tabela 3.	Resumo da análise de variância do teste F para condutância estomática ( <i>g<sub>s</sub></i> ), transpiração ( <i>E</i> ), concentração interna de CO <sub>2</sub> ( <i>C<sub>i</sub></i> ), taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> ( <i>A</i> ), eficiência instantânea da carboxilação ( <i>A/C<sub>i</sub></i> ), altura de planta (AP), diâmetro da haste (DH), número de capulhos (Ncap), massa de capulhos (Mcap), produção de algodão em caroço (Pac) e produtividade da água de três genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica.....	87
Tabela 4.	Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para condutância estomática ( <i>g<sub>s</sub></i> ) e transpiração ( <i>E</i> ) de genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica.....	88
Tabela 5.	Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para concentração interna de CO <sub>2</sub> ( <i>C<sub>i</sub></i> ) e taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> ( <i>A</i> ) de genótipos de algodoeiros sob restrição	

	hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica.....	90
Tabela 6.	Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para altura de planta (AP) e diâmetro da haste (DH) aos 115 DAE de genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica.....	92
Tabela 7.	Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para número de capulhos (Ncap) e massa de capulhos (Mcap) de genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica aos 120 DAE.....	93
Tabela 8.	Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para produção de algodão em caroço (Pac) e produtividade da água (Yw) de genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica aos 120 DAE .....	95
Tabela 9	Autovalores, variância, coeficientes de correlação entre Componentes Principais e variáveis.....	96



## SUMÁRIO

RESUMO GERAL .....	xiv
GENERAL ABSTRACT.....	xv
<b>CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
1 INTRODUÇÃO GERAL .....	18
2 OBJETIVOS.....	19
2.1 Geral .....	19
2.2 Específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
3.1 Aspectos gerais do algodoeiro .....	20
3.2 Requerimento hídrico do algodoeiro .....	21
3.3 Déficit hídrico no algodoeiro.....	22
3.4 Importância do piruvato na fisiologia das plantas .....	23
4 REFERÊNCIAS CITADAS .....	25
<b>CAPÍTULO II: ÁCIDO PIRÚVICO COMO ATENUANTE DO DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO NA FASE VEGETATIVA</b> ...	30
Resumo: .....	31
Abstract.....	31
INTRODUÇÃO.....	32
MATERIAL E MÉTODOS.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
CONCLUSÕES .....	51
AGRADECIMENTOS .....	51
REFERÊNCIAS CITADAS .....	51
<b>CAPÍTULO III: ÁCIDO PIRÚVICO NA INDUÇÃO A TOLERÂNCIA DO ALGODOEIRO AO DÉFICIT HÍDRICO NO FLORESCIMENTO</b> .....	55
Resumo .....	56
Abstract.....	56
INTRODUÇÃO.....	57
MATERIAL E MÉTODOS.....	58
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
AGRADECIMENTOS .....	76
REFERÊNCIAS CITADAS.....	76
<b>CAPÍTULO IV: APLICAÇÃO FOLIAR DE C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub> EM GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO VARIANDO A FASE FENOLÓGICA</b> .....	79

Resumo .....	80
Abstract.....	81
INTRODUÇÃO.....	81
MATERIAL E MÉTODOS.....	83
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	87
CONCLUSÕES .....	97
AGRADECIMENTOS .....	97
REFERÊNCIAS CITADAS .....	98

SILVA, F. de A. **ECOFISIOLOGIA DE GENÓTIPOS DE ALGODOIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO E APLICAÇÃO DE ÁCIDO PIRÚVICO** 2022. 100p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, PB.

### RESUMO GERAL

O déficit hídrico é um importante fator abiótico que afeta de forma negativa o crescimento e a produtividade das culturas. O ácido pirúvico participa do processo da quebra da molécula da glicose em duas moléculas de ácido pirúvico, essenciais no metabolismo do ciclo de Krebs e na cadeia respiratória, resultando na produção de moléculas de ATP, vitais para o desenvolvimento das plantas, no entanto, os estudos sobre os efeitos de sua aplicação exógena nas plantas são escassos. Nesse contexto, objetivou-se avaliar parâmetros ecofisiológicos de genótipos de algodoeiro cultivados sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica da cultura. A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação, em vasos com 25 dm<sup>3</sup> de solo. Para tanto, foram testados três genótipos de algodoeiro (BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966) submetidos a quatro tratamentos (C – controle, irrigação plena, C+P – Controle + aplicação de ácido pirúvico, E – déficit hídrico e E+P – déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico) avaliados em duas fases fenológicas (vegetativa e florescimento), distribuídos em blocos casualizados em esquema fatorial (3×4) com 3 repetições. Os efeitos dos tratamentos no algodoeiro foram avaliados mediante: análises de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* variáveis de crescimento, produtividade da água e componentes de produção. Na fase vegetativa, o ácido pirúvico é eficiente em minorar os efeitos do déficit hídrico nas trocas gasosas e produtividade da água. Plantas do genótipo BRS Seridó sob irrigação plena, quando aplicado ácido pirúvico obtém maior produção de algodão em caroço enquanto que a fluorescência variável, fluorescência máxima, massa de capulhos e a produção de algodão em caroço do algodoeiro FM 966 reduz com o déficit hídrico. Na fase de florescimento, o déficit hídrico decresce com maior intensidade o número de capulhos, a massa de capulhos, a produção de algodão em caroço e a produtividade da água no algodoeiro FM 966 em relação ao BRS Seridó e CNPA 7MH. A aplicação foliar de ácido pirúvico minora os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) em plantas do genótipo CNPA 7MH. A produtividade da água do algodoeiro sob irrigação plena aumenta com a

aplicação foliar de ácido pirúvico. O déficit hídrico na fase vegetativa é menos prejudicial à cultura do algodoeiro do que no florescimento.

**Palavras-chave:** *Gossypium hirsutum* L.; trocas gasosas; eficiência fotoquímica, manejo da água, biotecnologia.

**SILVA, F. de A. ECOPHYSIOLOGY OF COTTON GENOTYPES UNDER WATER DEFICIT AND APPLICATION OF PYRUVIC ACID, 2022.** 100p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering). The Federal University of Campina Grande, Center for Technology and Natural Resources. Campina Grande, PB.

#### GENERAL ABSTRACT

Water deficit is an important abiotic factor that negatively affects crop growth and productivity. Pyruvic acid participates in the process of breaking the glucose molecule into two molecules of pyruvic acid, essential in the metabolism of the Krebs cycle and in the respiratory chain, resulting in the production of ATP molecules, vital for the development of plants, however, the studies on the effects of its exogenous application on plants are scarce. In this context, the objective was to evaluate ecophysiological parameters of cotton genotypes cultivated under water deficit and application of pyruvic acid varying the phenological phase of the crop. The research was carried out in a greenhouse, in pots with 25 dm<sup>3</sup> of soil. For this purpose, three cotton genotypes (BRS Seridó, CNPA 7MH and FM 966) were tested and submitted to four treatments (C – control, full irrigation, C+P – Control + application of pyruvic acid, E – water deficit and E+P – water deficit and application of pyruvic acid) evaluated in two phenological phases (vegetative and flowering), distributed in randomized blocks in a factorial scheme (3×4) with 3 replications. The effects of treatments on cotton were evaluated using: analysis of gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth variables, water productivity and production components. In the vegetative phase, pyruvic acid is efficient in reducing the effects of water deficit on gas exchange and water productivity. Plants of the BRS Seridó genotype under full irrigation, when pyruvic acid is applied, obtain higher seed cotton production, while the variable fluorescence, maximum fluorescence, boll mass and seed cotton production of the FM 966 cotton plant reduces with water deficit. In the flowering phase, the water deficit decreases with greater intensity the number of bolls, boll mass,

seed cotton production and water productivity in cotton FM 966 compared to BRS Seridó and CNPA 7MH. Foliar application of pyruvic acid reduces the deleterious effects of water deficit on maximum PSII quantum efficiency ( $F_v/F_m$ ) and PSII photochemical efficiency ( $F_v/F_o$ ) in plants of the CNPA 7MH genotype. Cotton plant water productivity under full irrigation increases with foliar application of pyruvic acid. The water deficit in the vegetative phase is less harmful to the cotton crop than in flowering.

**Key words:** *Gossypium hirsutum* L.; gas exchange; photochemical efficiency, water management, biotechnology.

**CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS E REVISÃO  
BIBLIOGRÁFICA**

---



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é cultivado em todo o planeta, sendo o Brasil um dos principais produtores e exportadores de algodão em pluma, garantindo o quinto lugar em produção e o segundo em exportação no cenário internacional (USDA, 2022). Todos os anos, uma média de 35 milhões de hectares são plantados em todo o planeta, envolvendo mais de 350 milhões de pessoas na cadeia produtiva, movimentando anualmente cerca de US\$ 12 bilhões (ABRAPA, 2019).

Diante de tal crescimento, o grande desafio dos produtores é aumentar a produtividade da cultura em áreas marginais, em que as chuvas são distribuídas de forma irregular ou insuficientes para atender a demanda hídrica da cultura. Devido ao cenário mundial de mudanças climáticas, a seca tem se tornado cada vez mais frequente em regiões áridas e semiáridas do planeta, com fortes impactos socioeconômicos.

As plantas, sob déficit hídrico, sofrem alterações em todos os processos fisiológicos, bioquímicos e morfológicos. No aspecto fisiológico, induz à produção e acúmulo de ácido abscísico (ABA), que está diretamente envolvido na abertura e fechamento dos estômatos, reduzindo a fotossíntese e outros processos de trocas gasosas. Além disso, aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROS), ocasionadas pela saída de elétrons para o meio celular a partir das atividades de transporte de elétrons de cloroplastos, mitocôndrias e de outras organelas (Sharma et al., 2012; Taiz et al., 2017). Como consequências há redução da divisão e expansão celular, formação e crescimento de estruturas vegetativas, alterações enzimáticas, além de interferir no potencial hídrico e de levar a senescência acelerada e abscisão das folhas (Jiménez et al., 2013; Ferrari et al., 2015; Taiz et al., 2017).

Na maioria dos estudos com algodoeiro, têm sido pesquisados efeitos da deficiência de água no solo, com reduções no crescimento, produtividade e qualidade das fibras de algodão (Snowden et al., 2013; Zonta et al., 2017; Cordão et al., 2018; Lima et al., 2018). Além de estudos fisiológicos e bioquímicos para identificação de genótipos mais tolerantes ao déficit hídrico, alguns trabalhos reportam sobre a ação da aplicação foliar de substâncias orgânicas como atenuadores desse estresse, a exemplo do cloreto de mepiquat, silício e ácido salicílico em diversas oleaginosas como o algodoeiro, no qual foi constatado efeito benéfico no desenvolvimento das plantas (Nagashima et al., 2005; Nagashima et al., 2007; Silva et al., 2017).

Além dessas substâncias tem-se o piruvato, elemento crucial no metabolismo do ciclo de Krebs, com um papel vital na conversão da glicose em energia, ou seja, a glicose (molécula com 6 carbonos) é quebrada em duas moléculas de ácido pirúvico (3 carbonos), em que no Ciclo de Krebs se transformam em energia (ATP) (Raven et al., 2014; Taiz et al., 2017).

Com piruvato, foi encontrado trabalho com *Arabidopsis thaliana*, em que folhas foram incubadas por um período de 2,5 h em ácido pirúvico nas concentrações de 10, 100 e 1000  $\mu\text{M}$ , não tendo alteração entre a aplicação de 100 e 1000  $\mu\text{M}$  (Shen et al., 2017). Com base nesses dados, o grupo de pesquisa do presente trabalho aprofundou os estudos com o amendoim, sob estresse hídrico, e os dados mostram que, o piruvato contribuiu para restaurar a ação das enzimas antioxidantes SOD (45%), CAT (129%) e APX (60%) na concentração de 50 mM (Barbosa et al., 2021).

Portanto, são relevantes os estudos sobre mecanismos fisiológicos e estratégias de mitigação dos efeitos do déficit hídrico no cultivo do algodoeiro, visando a geração de conhecimento e, conseqüentemente, viabilizar a sua exploração econômica. Os dados sobre efeitos da aplicação do piruvato na atenuação dos efeitos da seca podem ser um avanço na agricultura, especialmente, para as regiões semiáridas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Avaliar parâmetros ecofisiológicos de genótipos de algodoeiro cultivados sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica da cultura.

### **2.2 Específicos**

- Avaliar a aplicação foliar de ácido pirúvico como atenuante do déficit hídrico em genótipos de algodoeiro na fase vegetativa através de parâmetros fisiológicos, produção e produtividade da água.
- Avaliar a morfofisiologia, produção e produtividade da água de três genótipos de algodoeiro submetidos a déficit hídrico e aplicação foliar de ácido pirúvico no florescimento da cultura.

- Determinar as trocas gasosas, crescimento e produção do algodoeiro BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966 sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aspectos gerais do algodoeiro

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma dicotiledônea de ciclo anual ou perene, porte herbáceo, arbustivo ou arbóreo pertencente à família Malvaceae e gênero *Gossypium*, de origem tropical, entre o México e a América Central. O gênero inclui 49 espécies já conhecidas, mas esse número pode estar subestimado, pela falta de informações, principalmente, das espécies dos continentes Africano e Asiático (Echer et al., 2014).

Dentre as espécies, quatro se destacam pelas suas características de importância econômica, são elas: *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. herbaceum* e *G. arboreum* as mais cultivadas no mundo, sendo o *G. hirsutum* responsável por 90% do algodão cultivado no mundo (Gadelha et al., 2014; Hu et al., 2019).

As plantas de *G. hirsutum* têm hábito de crescimento indeterminado, haste ascendente, com altura variando entre 60 e 100 cm e apresenta dois tipos de ramificações, as de ramos vegetativos monopodiais e reprodutivos ou simpodiais (Borém e Freire, 2014). Os ramos reprodutivos possuem meristemas, um por ramo, que caracterizam o crescimento em “espiral” da parte basal para a parte apical das plantas. O crescimento inicial do ramo reprodutivo é paralisado ao se formar a primeira estrutura reprodutiva, sendo retomado logo em seguida, ao surgir um novo meristema (meristema axilar) para a formação de uma nova estrutura floral, podendo se repetir em sequência (Ritchie et al., 2007).

Além disso, essa espécie tem folhas largas, tri ou pentalobadas, sem bainha, mas com brácteas que fazem proteção extra à estrutura de reprodução, podendo haver nectários, interna ou externamente à sua base (Laws, 2013; Borém e Freire, 2014). As flores são hermafroditas, com pétalas creme ou amareladas que, quando expostas à radiação solar, os seus fitocromos reagem e as pétalas se tornam violáceas (Borém e Freire, 2014).

A planta possui, em todos os órgãos, glândulas de gossipol, substância tóxica para outros seres vivos, protegendo-a de herbivoria (Borém e Freire, 2014). Na ausência de

polinizadores, ocorre autofecundação das flores, mas, com a presença de insetos polinizadores na área, a polinização cruzada pode atingir altos valores, acima de 50%, tornando o sistema reprodutivo do algodoeiro como intermediário entre autogamia e alogamia (Borém e Miranda, 2013).

Os frutos são denominados de maçãs, quando verdes, com três a cinco lóculos e 11 sementes por lóculo, em média. Quando o fruto se abre, as fibras ficam expostas, sendo denominado de capulho; são fibras longas para a espécie, com presença de línter no tegumento das sementes (Borém e Freire, 2014).

O ciclo do algodoeiro pode ser dividido em 6 fases, a saber: 1ª fase- período entre a semeadura e a emergência da plântula, quando acontece a embebição e germinação da semente e emissão dos cotilédones, com duração média de quatro a dez dias; 2ª fase desenvolvimento vegetativo; 3ª fase- surgimento do primeiro botão floral, geralmente, aos 30 dias após emergência (DAE); 4ª fase- aparecimento da primeira flor entre 45 a 60 DAE; 6ª fase- abertura da primeira maçã (90 e 120 DAE); 5ª fase- colheita, quando as maçãs estão completamente abertas, o que acontece em média aos 120 DAE, dependendo do genótipo e das condições ambientais (Beltrão e Souza, 2011).

### **3.2 Requerimento hídrico do algodoeiro**

A disponibilidade de água é um fator chave para os processos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos das plantas, com consequências direta na produção agrícola (Khan et al., 2018). Assim, a disponibilidade adequada de água, em equilíbrio com os demais fatores de produção, é indispensável para a produção sustentável de algodão e o máximo rendimento agrícola.

A necessidade hídrica varia com as fases fenológicas da cultura. No estágio inicial de desenvolvimento, logo após a emergência, há necessidade de menor quantidade de água, com maior requerimento durante o florescimento, no pico de demanda hídrica (Chiavegato et al., 2009).

Segundo Chiavegato et al. (2009), a quantidade de água necessária para atender às necessidades hídricas do algodoeiro pode variar entre 500 e 1500 mm, a depender do clima e da duração do período total de crescimento da cultura. Esses autores ressaltam ainda, que em cultivares de ciclo curto (120 a 130 dias), para completar o ciclo a quantidade pode variar entre 500 e 700 mm. No entanto, saber a quantidade de água não

é suficiente, a distribuição também precisa ser adequada para atender à demanda específica em cada fase fenológica.

O algodoeiro necessita de cuidados, em especial, no período entre a emissão dos primeiros botões florais e a abertura da flor, quando a planta precisa estabelecer um dossel e um número de botões suficientes para ter um potencial produtivo alto (Marianato e Lima, 1982; Pettigrew, 2004; Yeates, 2014). Um estresse hídrico nessa fase leva à queda das estruturas reprodutivas, com consequências na produção da cultura (Bezerra et al., 2010; Aquino et al., 2012).

### 3.3 Déficit hídrico no algodoeiro

O déficit hídrico é um dos maiores desafios enfrentados pela agricultura, pois resulta em efeitos negativos nos processos vitais dos vegetais (Nagamalla et al., 2021). Em tais condições, pode ter acumulação de ácido abscísico (ABA), um mecanismo de adaptação das plantas que resulta em fechamento estomático, restrição da transpiração foliar e do fluxo de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para a câmara estomática, consequentemente, sendo menor a taxa fotossintética (Taiz et al., 2017; Khan et al., 2018; Parkash e Singh, 2020).

Para Vanlerberghe et al. (2020), a fotossíntese e a respiração dependem de um constante fluxo de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  entrando e saindo da célula, sendo que esse fluxo depende da abertura estomática. Portanto, o declínio da fixação de  $\text{CO}_2$  pelo fechamento estomático, causa um desequilíbrio entre os fotossistemas, assim, os elétrons livres produzidos pelos centros de reação não são transferidos para  $\text{NADP}^+$  (Yi et al, 2016; Taiz et al., 2017). E com isso, os portadores de elétrons são reduzidos em excesso, levando as plantas ao excesso de energia, formando espécies reativas tóxicas de oxigênio (EROs), como ânion superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), radical hidroxila ( $\text{HO}^\bullet$ ) e oxigênio singleto ( $^1\text{O}_2$ ), que irá prejudicar o metabolismo da planta (Noctor, et al., 2014; Yi et al, 2016; Foyer, 2018; Denaxa et al., 2020).

As EROs exercem papéis divergentes nas plantas. Em baixos níveis, as espécies reativas de oxigênio atuam como moléculas sinalizadoras, provocando uma resposta positiva no sistema antioxidante, no entanto, em níveis elevados, todas as formas de EROs, tais como oxigênio singleto ( $^1\text{O}_2$ ), radical superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e radical hidroxila ( $\text{HO}^\bullet$ ), tornam-se tóxicas e capazes de interagir com as moléculas orgânicas, promovendo a senescência e a morte celular (Barbosa et al., 2014;

Foyer, 2018; Tavanti et al., 2021). O equilíbrio entre a formação e a remoção de EROs é essencial para o bom funcionamento das células vegetais, especialmente, quando expostas ao estresse hídrico (Barbosa et al., 2014).

Para minorar os danos oxidativos, causados pelo estresse, as plantas têm um complexo sistema antioxidativo de defesa, composto por componentes enzimáticos e não enzimáticos. Entre os componentes não enzimáticos, se destacam o ascorbato, a glutaciona, os carotenoides e outros compostos fenólicos. Por outro lado, o mecanismo enzimático de desintoxicação envolve a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e a glutaciona redutase (GR) (Barbosa et al., 2014; Tavanti et al., 2021).

A SOD, enzima presente nos cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos, catalisa a dismutação do superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ), em que um  $O_2^{\bullet-}$  é reduzido a peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e outro oxidado a oxigênio molecular ( $O_2$ ), prevenindo assim, a formação de radical hidroxila ( $HO^{\bullet}$ ) no interior celular (Abouzari e Fakheri, 2015).

A CAT é responsável pela conversão do  $H_2O_2$  em  $H_2O$  e  $O_2$  (Mittler et al., 2004; Gill e Tuteja, 2010). Outra enzima importante desse complexo é a APX, que decompõe o  $H_2O_2$  no citosol e nos cloroplastos em água, usando o ascorbato como doador de elétrons (Mittler et al., 2004; Sharma et al., 2012).

Trabalhos conduzidos com algodoeiro sob restrição hídrica, relataram que a atividade das enzimas SOD, CAT e APX são eficientes em eliminar as espécies reativas de oxigênio, sendo utilizadas como mecanismo de tolerância pelas plantas (Sekmen et al., 2014; Yi et al., 2016; Prajapat et al., 2018).

O déficit hídrico pode também, afetar a síntese de fotoassimilados, por refletir em menor taxa de assimilação de  $CO_2$  e menor mobilização de reservas para o crescimento e manutenção das plantas (Rickes et al., 2017). As consequências são reduções no tamanho das folhas, no índice de área foliar, diminuição do número de estruturas reprodutivas, da altura das plantas, número de capulhos, rendimento de fibra e também da produtividade agrícola (Ul-allah et al., 2021).

### **3.4 Importância do piruvato na fisiologia das plantas**

A respiração celular desempenha um papel essencial para o crescimento e manutenção de todos os tecidos vegetais por estar associada à produção de energia (Hurry et al., 1995; Griffin e Turnbull, 2013). Por meio dela, a energia solar envolvida na



fotossíntese e armazenada como energia química, é liberada para a produção de ATP, a fonte de energia utilizada nas reações do metabolismo celular para manutenção, crescimento e desenvolvimento do vegetal (Griffin e Turnbull, 2013; Taiz et al., 2017). É numa das etapas iniciais da respiração, antecedente à formação de ATP, que surge o piruvato.

Nas plantas C3, em que se enquadra o algodoeiro, o piruvato está presente em processos envolvidos na respiração e fotorrespiração. Na respiração, ocorre a produção de piruvato na mitocôndria, como resultado da oxidação da glicose pelo metabolismo aeróbio (presença de oxigênio), em um processo conhecido como glicólise (Stanko et al., 1992).

A formação de piruvato, na via da respiração aeróbica, acontece em sequência de duas vias do metabolismo celular essenciais à célula: glicólise e ciclo de Krebs. Numa descrição resumida, duas moléculas de ácido pirúvico, produto final da glicólise (a glicose de 6 carbonos é quebrada em duas moléculas de 3 carbonos, o ácido pirúvico), passam do citosol para a matriz da mitocôndria, após conversão em Acetil-CoenzimaA é metabolizado pelo ciclo de Krebs para gerar equivalentes redutores mobilizados pela cadeia de transporte de elétrons durante a fosforilação oxidativa (Koh-Banerjee et al., 2005; Raven et al., 2014; Taiz et al., 2017).

Antes de entrar no ciclo de Krebs, o piruvato é descarboxilado em uma reação de oxidação catalisada pela piruvato desidrogenase, resultando em Acetil-CoA (Acetil-CoA), CO<sub>2</sub> e NADPH (Taiz et al., 2017). O Acetil-Coenzima A atua como substrato no ciclo do ácido cítrico (Jacoby et al., 2012), que é a fase seguinte da respiração celular e ao passar por uma série de reações, na cadeia respiratória ou cadeia de transporte de elétrons ('electron transport chain - ETC'), se dá a formação de mais moléculas energéticas (Taiz, et al., 2017). A ETC transcorre nas cristas mitocondriais, em que as moléculas produzidas nas fases anteriores (NADPH, FADH<sub>2</sub>) são convertidas em moléculas de ATP, a fonte principal de energia para as plantas e os seres vivos, em geral.

De acordo com Taiz et al. (2017), muitos fatores podem afetar a taxa respiratória das plantas, eles abrangem a natureza e a idade do tecido vegetal, bem como, fatores ambientais, como luz, temperatura, suprimento de nutrientes e de água, bem como as concentrações de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. A aplicação de piruvato, em plantas sob estresse hídrico, baseia-se na hipótese que, a suplementação de ácido pirúvico pode resultar em aumento da disponibilidade de energia para os processos metabólicos (ciclo de Krebs), o que deve economizar a planta de desdobrar moléculas de glicose (glicólise), ou seja, a economia

de energia pode criar condições mais favoráveis para ativação de mecanismos de tolerância ao fator de estresse.

#### 4 REFERÊNCIAS CITADAS

- Abouzari, A.; Fakheri, B. A. Reactive oxygen species: Generation, oxidative damage, and signal transduction. *International Journal of Life Sciences*, v.9, p.3-17, 2015. <https://doi.org/10.3126/ijls.v9i5.12699>
- Aquino, L. A.; Aquino, R. F. B. A.; Silva, T. C.; Santos, D. F.; Berger, P. G. Aplicação do fósforo e da irrigação na absorção e exportação de nutrientes pelo algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16 p.355-361, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400004>
- Barbosa, M. R.; Silva, M. M. A.; Willadino, L.; Ulisses, C; Camara, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. *Ciências Agrárias*, v.44, p.453-460, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300011>
- Beltrão, N. E. M.; Souza, J. G. de. Fisiologia e ecofisiologia do algodoeiro. In: empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Algodão: tecnologia de produção. Dourados: EMBRAPA- CNPAO, p.54-75. 2011.
- Bezerra, J. R. C.; Azevedo, P. V.; Silva, B. B.; Dias, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marron, irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.625-632, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000600009>
- Borém, A.; Freire, E. C. Algodão: do plantio a colheita. Minas Gerais: UFV, 2014. 312p.
- Borém, A.; Miranda, G. V. Sistemas Reprodutivos das Espécies Cultivadas. In: *Melhoramento de plantas*. 6. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2013. 57-63p.
- Chiavegato, E. J.; Salvatierra, D. K.; Gottardo, L. C. B. Cultivos temporários – Algodão. In: Monteiro, J. E. *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. INMET, 2009. 530p.
- Cordão, M. A.; Araújo, W. P.; Pereira, J. R.; Zonta, J. H.; Ferreira, F. N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico aplicado em fases fenológicas. *Revista Verde*, v.13, p.313-321, 2018. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i3.5933>
- Denaxa, N. K.; Damvakaris, T.; Roussos, P. A. Antioxidant defense system in young olive plants against drought stress and mitigation of adverse effects through external application of alleviating products. *Scientia Horticulturae*, v.259, p.1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108812>
- Echer, F. R.; Oosterhuis, D. M.; Loka, D. A.; Rosolem, C. A. High night temperatures during the floral bud stage increase the abscission of reproductive structures in cotton. *Journal of agronomy and crop science*, v.200, p.191-198, 2014. <https://doi.org/10.1111/jac.12056>

- Ferrari, E.; Paz, A.; Silva, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em sementes antecipadas no Mato Grosso. *Nativa*, Sinop, v.3, p.67-77, 2015. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v03n01a12>
- Foyer, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, v.154, p.134-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
- Gadelha, I. C. N.; Fonseca, N. B. S.; Oloris, S. C. S.; Melo, M. M.; Soto-Blanco, B. Gossypol toxicity from cottonseed products. *The Scientific World Journal*, v.2014, p.1-11, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/231635>
- Gill, S. S.; Tuteja, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry*, v.48, p.909-930, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Griffin, K. L.; Turnbull, M. H. Light saturated RuBP oxygenation by Rubisco is a robust predictor of light inhibition of respiration in *Triticum aestivum* L. *Plant Biology*, v.15, p.769-775, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00703.x>
- Hu, Y.; Chen, J.; Fang, L.; Zhang, Z.; Ma, W.; Niu, Y.; Ju, L.; Deng, J.; Zhao, T.; Lian, J.; Baruch, K.; Fan, D.; Liu, X.; Ruan, Y. L.; Rahman, M.; Han, J.; Wang, K.; Wang, Q.; Wu, H.; Mei, G.; Zang, Y.; Han, Z.; Xu, C.; Shen, W.; Yang, D.; Si, Z.; Dai, F.; Zou, L.; Huang, F.; Bai, Y.; Zhang, Y.; Brodt, A.; Bem-Hamo, H.; Zhu, X.; Zhou, B.; Guan, X.; Zhu, S.; Chen, X.; Zhang, T. *Gossypium barbadense* and *Gossypium hirsutum* genomes provide insights into the origin and evolution of allotetraploid cotton. *Nature genetics*, v.51, p.739-748, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0371-5>.
- Hurry, V.; Tobiaeson, M.; Krömer, S.; Gardeström, P.; Öquist, G. Mitochondria contribute to increased photosynthetic capacity of leaves of winter rye (*Secale cereale* L.) following cold-hardening. *Plant, Cell and Environment*, v.18, p.69-76, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00545.x>
- Hurry, V.; Tobiaeson, M.; Krömer, S.; Gardeström, P.; Öquist, G. Mitochondria contribute to increased photosynthetic capacity of leaves of winter rye (*Secale cereale* L.) following cold-hardening. *Plant, Cell and Environment*, v.18, p.69-76, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00545.x>
- Jacoby, R. P.; Li, L.; Huang, S.; Pong Lee, C.; Millar, A. H.; Taylor, N. L. Mitochondrial composition, function and stress response in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, v.54, p.887-906, 2012. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01177.x>
- Jiménez, S.; Dridi, J.; Gutiérrez, D.; Moret, D.; Irigoyen, J. J.; Moreno, M. A.; Gogorcena, Y. Physiological, biochemical and molecular responses in four *Prunus* rootstocks submitted to drought stress. *Tree Physiology*, v.33, p.1061-1075, 2013. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpt074>

- Khan, A.; Pan, X.; Najeeb, U.; Tan, D. K. Y.; Fahad, S.; Zahoor, R.; Luo, H. Coping with drought: stress and adaptive mechanisms, and management through cultural and molecular alternatives in cotton as vital constituents for plant stress resilience and fitness. *Biological research*, v. 51, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40659-018-0198-z>
- Koh-Banerjee, P. K.; Ferreira, M. P.; Greenwood, M.; Bowden, R. G.; Cowan, P. N.; Almada, A. L.; Kreider, R. B. Effects of calcium pyruvate supplementation during training on body composition, exercise capacity, and metabolic responses to exercise. *Nutrition*, v.21, p.312-319, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nut.2004.06.026>
- Laws, B. 50 plantas que mudaram o rumo da história. Rio de Janeiro: Sextante, 2013. 224p
- Lima, R. F.; Araújo, W. P.; Pereira, J. R., Cordão, M. A., Ferreira, F. N.; Zonta, J. H. Fibras de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.13, p.427-436, 2018. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i4.5940>
- Marianato, R.; Lima, C. A. S. Irrigação do algodoeiro. *Informe Agropecuário*. Belo Horizonte, v.8, p.75-81, 1982.
- Mittler, R.; Vanderauwera, S.; Gollery, M.; Breusegem, F. V. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, v.9, p.490-498, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.08.009>
- Nagamalla, S. S.; Alaparthi, M. D.; Mellacheruvu, S.; Gundeti, R.; Earrawandla, J. P. S.; Sagurthi, S. R. Morpho-Physiological and Proteomic Response of Bt-Cotton and Non-Bt Cotton to Drought Stress. *Frontiers in plant science*, v.12, p.658, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663576>
- Nagashima, G. T.; Marur, C. J.; Yamaoka, R. S.; Miglioranza, É. Desenvolvimento de plantas de algodão provenientes de sementes embebidas em cloreto de mepiquat. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.40, p.943-946, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000900015>
- Nagashima, G. T.; Miglioranza, É.; Marur, C. J.; Yamaoka, R. S.; Gomes, J. C. Embebição de sementes e aplicação foliar com cloreto de mepiquat no crescimento e produção do algodoeiro. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.1027-1034, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400013>
- Noctor, G.; Mhamdi, A.; Foyer, C. H. The Roles of Reactive Oxygen Metabolism in Drought: Not So Cut and Dried. *Plant Physiology*, v.164, p.1636-1648, 2014. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233478>
- Parkash, V.; Singh, S. A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. *Sustainability*, v.12, p.3945, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12103945>

- Pettigrew, W.T. Moisture deficit effects on cotton lint yield, yield components, and boll distribution. *Agronomy Journal*. v.96, p.377-383, 2004. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.3770>
- Prajapat, P.; Singh, D.; Tripathi, S.; Patel, K.; Abbas, H.; Patel, A. Effect of water stress on antioxidative enzymes and glycine betaine content in drought tolerant and drought susceptible cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics*. v.55, p.198-204, 2018.
- Raven, P. H.; Evert, R. F.; Eichhorn, S. E. *Biologia vegetal*. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 2014. 876p.
- Rickes, L. N.; Klumb, E. K.; Silva, C. D. S; Bacarin, M. A.; Bianchi, V. J. Water deficit affects gas exchange in peach trees cultivar chimarrita grafted onto different rootstocks. *Irriga*, v.22, p.140-153, 2017. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p140-153>
- Ritchie, G. L.; Bednarz, C. W.; Jost, P. H.; Brown, S. M. *Cotton Growth and Development*. Georgia: The University of Georgia – Cooperative Extension. 2007. 16p.
- Sekmen, A. H.; Ozgur, R.; Uzilday, B.; Turkan, I. Reactive oxygen species scavenging capacities of cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars under combined drought and heat induced oxidative stress. *Environmental and Experimental Botany*, v.99, p.141-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envexbot.2013.11.010>
- Sharma, P.; Jha, A. B.; Dubey, R. S.; Pessarakli, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, v.2012, p.1-26, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>
- Shen, J. L.; Li, C. L.; Wang, M.; He, L. L.; Lin, M. Y.; Chen, D. H.; Zhang, W. Mitochondrial pyruvate carrier 1 mediates abscisic acid-regulated stomatal closure and the drought response by affecting cellular pyruvate content in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plant Biology*, v.17, p.217, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1175-3>
- Silva, A. C. da.; Suassuna, J. F.; Melo, A. S. de.; Costa, R. R.; Andrade, W. L. de.; Silva, D. C. da. Salicylic acid as attenuator of drought stress on germination and initial development of sesame. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.156-162, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p156-162>
- Snowden, C.; Ritchie, G.; Cave, J.; Keeling, W.; Rajan, N. Multiple irrigation levels affect boll distribution, yield, and fiber micronaire in cotton. *Agronomy Journal*, v.105, p.1536-1544, 2013. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0084>
- Stanko, R. T.; Reynolds, H. R.; Lonchar, K. D.; Arch, J. E. Plasma lipid concentrations in hyperlipidemic patients consuming a high-fat diet supplemented with pyruvate for 6 wk. *The American journal of clinical nutrition*, v.56, p.950-954, 1992. <https://doi.org/10.1093/ajcn/56.5.950>

- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Tavanti, T. R.; De Melo, A. A. R.; Moreira, L. D. K.; Sanchez, D. E. J.; Santos Silva, R.; Silva, R. M.; Reis, A. R. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.160, p.386- 396, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
- Ul-Allah, S.; Rehman, A.; Hussain, M.; Farooq, M. Fiber yield and quality in cotton under drought: Effects and management. *Agricultural Water Management*, v.255, p.106994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106994>
- United States Department of Agriculture. Cotton: World Markets and Trade (2022). Disponível em <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/kp78gg36g/vm40zt73t/4j03f111m/cotton.pdf>
- Vanlerberghe, G. C.; Dahal, K.; Alber, N. A.; Chadee, A. Photosynthesis, respiration and growth: A carbon and energy balancing act for alternative oxidase. *Mitochondrion*, v. 52, p. 197-211, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mito.2020.04.001>
- Yeates, S. J. Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro. In: Echer, F. R. (Ed.). O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes. Cuiabá, MT: Instituto Mato-Grossense do Algodão, p.63-77, 2014.
- Yi, X. P.; Zhang, Y. L.; Yao, H. S.; Luo, H. H.; Gou, L.; Chow, W. S.; Zhang, W. F. Rapid recovery of photosynthetic rate following soil water deficit and re-watering in cotton plants (*Gossypium herbaceum* L.) is related to the stability of the photosystems. *Journal of Plant Physiology*, v.194, p.23-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.016>
- Zonta, J. H.; Brandão, Z. N.; Rodrigues, J. I. da S.; Sofiatti, V. Cotton response to water deficits at different growth stages. *Revista Caatinga*, v.30, p.980-990, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n419rc>



**CAPÍTULO II: ÁCIDO PIRÚVICO COMO ATENUANTE DO DÉFICIT HÍDRICO  
EM GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO NA FASE VEGETATIVA**

---

## ACIDO PIRÚVICO COMO ATENUANTE DO DÉFCITI HIDRICO EM GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO NA FASE VEGETATIVA

**Resumo:** Na cotonicultura de sequeiro, a produtividade, em geral, é baixa, devido à baixa e irregular pluviosidade, o que realça a importância de estudos para minorar os efeitos do déficit hídrico. Assim, objetivou-se avaliar a aplicação exógena de ácido pirúvico como atenuante do déficit hídrico em genótipos de algodoeiro na fase vegetativa. O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão, em Campina Grande, PB. Para tanto, três genótipos de algodão (BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966) foram submetidos a quatro tratamentos na fase vegetativa (C- controle, irrigação plena, C+P – irrigação plena mais aplicação foliar de ácido pirúvico, E - déficit hídrico e E+P - déficit hídrico e aplicação foliar de ácido pirúvico), distribuídos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial (3×4) com três repetições, perfazendo 36 unidades experimentais, sendo a parcela composta por 2 plantas. Constatou-se que, a aplicação de ácido pirúvico é eficiente em minorar os efeitos do déficit hídrico sobre as trocas gasosas do algodoeiro na fase vegetativa. As plantas do genótipo BRS Seridó sob irrigação plena, com o ácido pirúvico obtém maior produção de algodão em caroço. O algodoeiro FM 966, é sensível ao déficit hídrico na fase vegetativa, com reduções na fluorescência variável, fluorescência máxima, massa de capulhos e na produção de algodão em caroço. A produtividade da água em algodoeiros sob déficit hídrico é beneficiada pela aplicação foliar de ácido pirúvico.

**Palavras-chave:** *Gossypium hirsutum* L., estresse abiótico, piruvato, produtividade da água.

## PHYSIOLOGY AND PRODUCTION OF COTTONS UNDER WATER STRESS AND FOLIAR APPLICATION OF PYRUVATE IN THE VEGETATIVE PHASE

**Abstract:** In rainfed cotton farming, productivity, in general, is low, due to low and irregular rainfall, which highlights the importance of studies to lessen the effects of water deficit. Thus, the objective was to evaluate the exogenous application of pyruvic acid as an attenuator of the water deficit in cotton genotypes in the vegetative phase. The experiment was conducted under greenhouse conditions at the Brazilian Agricultural Research Corporation – Embrapa Algodão, in Campina Grande, PB. For that, three cotton

genotypes (BRS Seridó, CNPA 7MH and FM 966) were submitted to four treatments in the vegetative phase (C- control, full irrigation, C+P – full irrigation plus foliar application of pyruvic acid, E - water deficit and E+P - water deficit and foliar application of pyruvic acid), distributed in a randomized block design in a factorial scheme (3×4) with three replications, totaling 36 experimental units, with the plot consisting of 2 plants. It was found that the application of pyruvic acid is efficient in reducing the effects of water deficit on gas exchange in cotton in the vegetative phase. Plants of the BRS Seridó genotype under full irrigation, with pyruvic acid, obtain higher seed cotton production. Cotton FM 966 is sensitive to water deficit in the vegetative phase, with reductions in variable fluorescence, maximum fluorescence, boll mass and seed cotton production. Water productivity in cotton plants under water deficit is benefited by foliar application of pyruvic acid.

**Key words:** *Gossypium hirsutum* L., abiotic stress, pyruvate, water productivity.

## INTRODUÇÃO

A cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.) movimenta diversos setores da economia durante a cadeia produtiva, que através do beneficiamento das fibras e sementes, gera empregos e renda (Zonta et al., 2016; Alves et al., 2019). Para CONAB (2022), por causa da cotação da pluma em patamar elevado, a estimativa de produção de algodão no Brasil, para a safra 2021/ 2022 é de 2,82 milhões de toneladas, aumento de 19,5% em relação à safra 2019/20.

O algodoeiro mesmo considerado menos exigente em água, requer boa distribuição da pluviosidade, pois sua exigência hídrica é de 550-600 mm (Zwart e Bastiaanssen, 2004; Farahani, 2008). Entretanto, as mudanças climáticas têm aumentado a frequência e a intensidade dos períodos de estresses abióticos, especialmente a seca, que tem se tornado o fator ambiental que mais limita a cotonicultura em regiões áridas e semiáridas (Niu et al., 2018; Ul-Allah et al., 2021).

Para lidar com essa condição, as plantas desenvolveram uma série de respostas fisiológicas, bioquímicas, moleculares e morfológicas (Santos et al., 2022). Ao nível fisiológico diminui a condutância estomática, como forma de conter a perda de água por transpiração, o que reflete na redução da maioria dos parâmetros de trocas gasosas. E por essa razão, há um desequilíbrio entre a fase fotoquímica e o metabolismo do carbono pela diminuição da difusão do CO<sub>2</sub> (Chaves et al., 2009). Como consequência, a atividade da

cadeia de transporte de elétrons nos cloroplastos e nas mitocôndrias é reduzida, levando à formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Foyer, 2018; Denaxa et al., 2020). No âmbito molecular, há alteração da expressão gênica e síntese de proteínas (Deeba et al., 2012) e por isso, ocorre o enrolamento, amarelecimento e queda prematura de folhas e flores, refletindo no crescimento e desenvolvimento das plantas (Seleiman et al., 2021).

Embora sejam bem relatados os efeitos do déficit hídrico no algodão, poucos estudos sobre uso de substâncias orgânicas para atenuar os efeitos do estresse hídrico nos vários processos metabólicos das plantas.

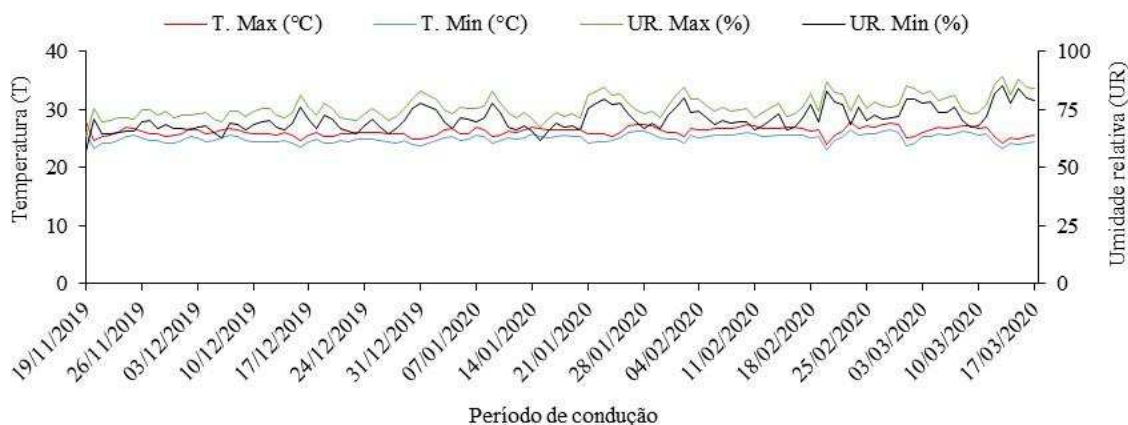
O ácido pirúvico, por exemplo, é um dos produtos que pode ser utilizado, pois no metabolismo vegetal participa da glicólise, que consiste na quebra da molécula da glicose em duas moléculas de ácido pirúvico, essenciais no metabolismo do ciclo de Krebs e na cadeia respiratória, resultando na produção de moléculas de ATP (Kerbaui, 2008; Taiz et al., 2017). A aplicação exógena desse produto pode disponibilizar mais moléculas de piruvato às células, assim, parte da energia que seria gasta na glicólise para a produção de ácido pirúvico será empregada em processos de adaptação ao estresse hídrico.

Com piruvato foi encontrado na literatura trabalho com *Arabidopsis thaliana*, em que folhas foram incubadas, por um período de 2,5 h, nas concentrações de 10, 100 e 1000  $\mu\text{M}$  e os resultados apontam que, na concentração de 100  $\mu\text{M}$ , o piruvato aumentou a corrente aniônica nas células guarda, levando ao fechamento estomático (Shen et al., 2017). Com base nesse trabalho, Barbosa et al. (2021) aprofundaram estudos com o amendoim sob estresse hídrico, e notaram que, o piruvato contribuiu para restaurar a ação das enzimas antioxidantes SOD (45%), CAT (129%) e APX (60%) quando aplicado na concentração de 50 mM (Barbosa et al., 2021). Assim, são promissores os resultados com a aplicação de piruvato como atenuante do déficit hídrico, com perspectivas de avanço da agricultura, sobretudo, em áreas de regiões semiáridas, onde a produção, em geral, é prejudicada por estiagens e secas.

Com base nessas premissas, objetivou-se com o estudo apresentado avaliar a aplicação exógena de ácido pirúvico como atenuante do déficit hídrico em genótipos de algodoeiro na fase vegetativa.

## MATERIAL E METÓDOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa algodão, localizada no município de Campina Grande, estado da Paraíba, Brasil (06° 48' 50" S e 37° 56' 31" W e altitude de 550 m). Os dados climáticos durante a execução do experimento estão na Figura 1.



**Figura 1.** Temperatura máxima (T.Max), mínima (T.Min), umidade relativa do ar máxima (UR.Máx) e mínima (UR.Mín) durante a execução da pesquisa.

Os três genótipos de algodoeiros escolhidos - BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966 - foram submetidos a quatro tratamentos na fase vegetativa (C - controle, irrigação plena durante todo ciclo da cultura; C+P) - controle + aplicação de 100  $\mu$ M de ácido pirúvico na fase vegetativa; E - déficit hídrico com suspensão da irrigação por 7 dias na fase vegetativa e E+P - déficit hídrico + aplicação de 100  $\mu$ M de ácido pirúvico na fase vegetativa. A suspensão da irrigação só teve início no estágio V2, aos 15 dias após a emergência (DAE), e aplicação foliar com ácido pirúvico no quarto, quinto e sexto dia após o início da suspensão da irrigação. As plantas que não foram suplementadas com ácido pirúvico, receberam aplicação de água destilada na mesma proporção da solução de piruvato.

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial 3  $\times$  4, com três repetições, perfazendo 36 unidades experimentais. Cada unidade recebeu duas plantas, totalizando 72 plantas.

As plantas foram conduzidas em vasos plásticos (33 cm  $\times$  25 cm), dispostos em linhas espaçadas de 1,0 m entre si e 0,5 m dentro de cada linha, forrados com uma tela fina na parte inferior para evitar a perda de solo e uma camada de 3,0 cm de brita para

evitar a obstrução do dreno pelo material de solo, uma mangueira foi colocada na parte inferior do vaso e acoplada a um recipiente plástico com capacidade de 2,0 L para coletar a água de drenagem.

Os lisímetros foram preenchidos com 25 dm<sup>3</sup> de material de solo (Neossolo Regolítico) coletado no município de Campina Grande, área do Agreste paraibano, cujos atributos químicos e físico-hídricos, determinados em laboratório, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), dispostos para consulta na Tabela 1.

**Tabela 1.** Atributos químicos e físico-hídricos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCG), Campina Grande, PB

pH	P	K	Ca	Na	Mg	Al	H	SB	CTC	v	m	MO
5,79	mg dm <sup>-3</sup>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....%	.....	g dm <sup>-3</sup>
	0,1	0,13	0,88	0,06	1,0	0,52	1,28	2,07	3,87	53,48	20,07	6,2
	Granulometria			D. do solo (g cm <sup>-3</sup> )		Porosidade (%)		P. matriciais (atm)		Umidade (%)		Água disponível (%)
	Areia	Silte		Argila								
	.....(%).....							0,10		9,19		
	92,07	6,03	1,90	1,63		40,29						5,37
	Classificação							15,00		3,82		
	Areia franca											

CTC a pH 7,0; Extração: Água (pH); Mehlich (P, K, Na); KCl 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al).

Antes da semeadura, a umidade do solo foi elevada ao nível correspondente próximo ao da capacidade de campo, determinado através do método de saturação por capilaridade seguida por drenagem. Na semeadura, distribuiu-se quatro sementes por lisímetro na profundidade de 1,5 cm. Aos 10 dias após a emergência (DAE), foi feito o desbaste, deixando duas plantas por vaso, as consideradas mais vigorosas.

Momentos antes da aplicação foliar, a solução de piruvato (100 µM) foi obtida a partir da diluição de 6,9 µL de ácido pirúvico em 1,0 L de água destilada. As pulverizações das plantas foram realizadas ao final da tarde com auxílio de um borrifador. Visando evitar deriva durante esse processo, as plantas foram protegidas com plástico; e o solo coberto com uma manta impermeável.

Ao final do período de suspensão da irrigação, foram recolhidas amostras de solo com auxílio de um mini-trado, em seguida, colocadas em latas de alumínio e pesadas para obtenção da massa úmida. Após essa etapa, foram levadas para secarem em estufa a 105 °C por 72 horas, para saber a massa seca, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Umidade do solo de cada tratamento ao final do déficit hídrico na fase de vegetativa aos 25 DAE.

Tratamentos	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
	Umidade do solo (%)		
Controle	22,97	21,50	18,14
Déficit hídrico	15,63	15,45	14,94
Déficit hídrico + piruvato	16,02	16,24	15,77

As irrigações foram realizadas diariamente, às 17 horas, com aplicação em cada lisímetro (vaso) do volume de água correspondente à demanda da planta no período, conforme o tratamento. O volume aplicado em cada evento de irrigação foi estimado por meio de balanço hídrico, tomando-se como base os termos da Eq. 1,

$$C_H = V_a - V_d \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

$C_H$ : consumo hídrico (mL)

$V_a$ : volume de água aplicado às plantas no dia anterior (mL)

$V_d$ : volume drenado, quantificado na manhã do dia seguinte (mL)

O volume de água drenado do dia anterior foi usado novamente na irrigação, com objetivo de aproveitar os nutrientes que por ventura fossem lixiviados do solo.

A adubação com NPK seguiu as recomendações para ensaios em vasos (Novais et al., 1991), aplicando-se as quantidades de 100, 300 e 150 mg de N, P e K por  $\text{dm}^{-3}$  de solo, respectivamente, nas formas de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A adubação de fundação feita apenas com fósforo e as adubações de cobertura com N e K, parceladas em três vezes (na fase vegetativa, na fase de aparecimentos dos primeiros botões florais e na abertura da primeira flor). Por vaso, foi o total de 37,5 g de supersimples, 5,55 g de ureia e 6,25 g de cloreto de potássio.

O controle de pragas e doenças foi realizado de modo preventivo com defensivos naturais, conforme a necessidade. Já o controle de ervas daninhas de maneira periódica e manual. No período de produção, realizou-se o tutoramento das plantas para evitar o acamamento dos ramos pelo peso das maçãs.

Os parâmetros fisiológicos foram avaliados aos 22 DAE, por ocasião do final do período de suspensão hídrica, no horário entre 7 e 9 horas. A condutância estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração ( $E$ ) ( $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ), foram analisadas por meio de

um equipamento portátil de trocas gasosas por infravermelho (Infra Red Gas Analyser-IRGA, da ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro), tomando como base a terceira folha do ápice da planta. As medições de temperatura do ar e concentração de CO<sub>2</sub> aconteceram sob condições do ambiente, e a luminosidade ajustada em 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiação, usando uma fonte artificial própria do equipamento. Com os dados de trocas gasosas foi estimada a eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ).

Nas mesmas datas relacionadas para as trocas gasosas foram analisados os parâmetros de fluorescência da clorofila *a*, com um fluorômetro de pulso modulado, modelo OS5p da Opti Science, obtendo-se fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e a máxima eficiência quântica do PSII ( $F_v/F_m$ ). As leituras foram feitas em folhas adaptadas ao escuro por um período de 30 minutos.

Os componentes de produção quantificados pela colheita das cápsulas até 120 DAE, sendo determinado o número de capulhos por planta ( $N_{cap}$ ), massa de capulhos por planta ( $M_{cap}$  - g) e a produção de algodão em caroço ( $P_{ac}$  - g). Logo após, estimou-se a produtividade da água ( $Y_w$  - g L<sup>-1</sup>), obtida pela relação entre massa de algodão em caroço e a lâmina total de água aplicada durante o ciclo da planta, em função dos tratamentos, conforme a Eq. 2, adaptada de Geerts e Raes (2009).

$$Y_w = \frac{P_{ac}}{I} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$Y_w$ - Produtividade da água (g L<sup>-1</sup>);

$P_{ac}$ - Produção de algodão em caroço (g);

$I$ - Lâmina de água aplicada por planta (L).

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade das variâncias e quando com distribuição normal pela análise de variância do teste F. A significância dos tratamentos determinada pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), com o software estatística Sisvar (Ferreira, 2019). Com auxílio do Excel, as informações obtidas para as variáveis foram submetidas a estimativa do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) que representa a correlação entre duas variáveis e assume valores de -1 a 1, conforme equação 3.

(Eq.3)



$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e  $y_1, y_2, \dots, y_n$  são valores medidos de ambas as variáveis.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

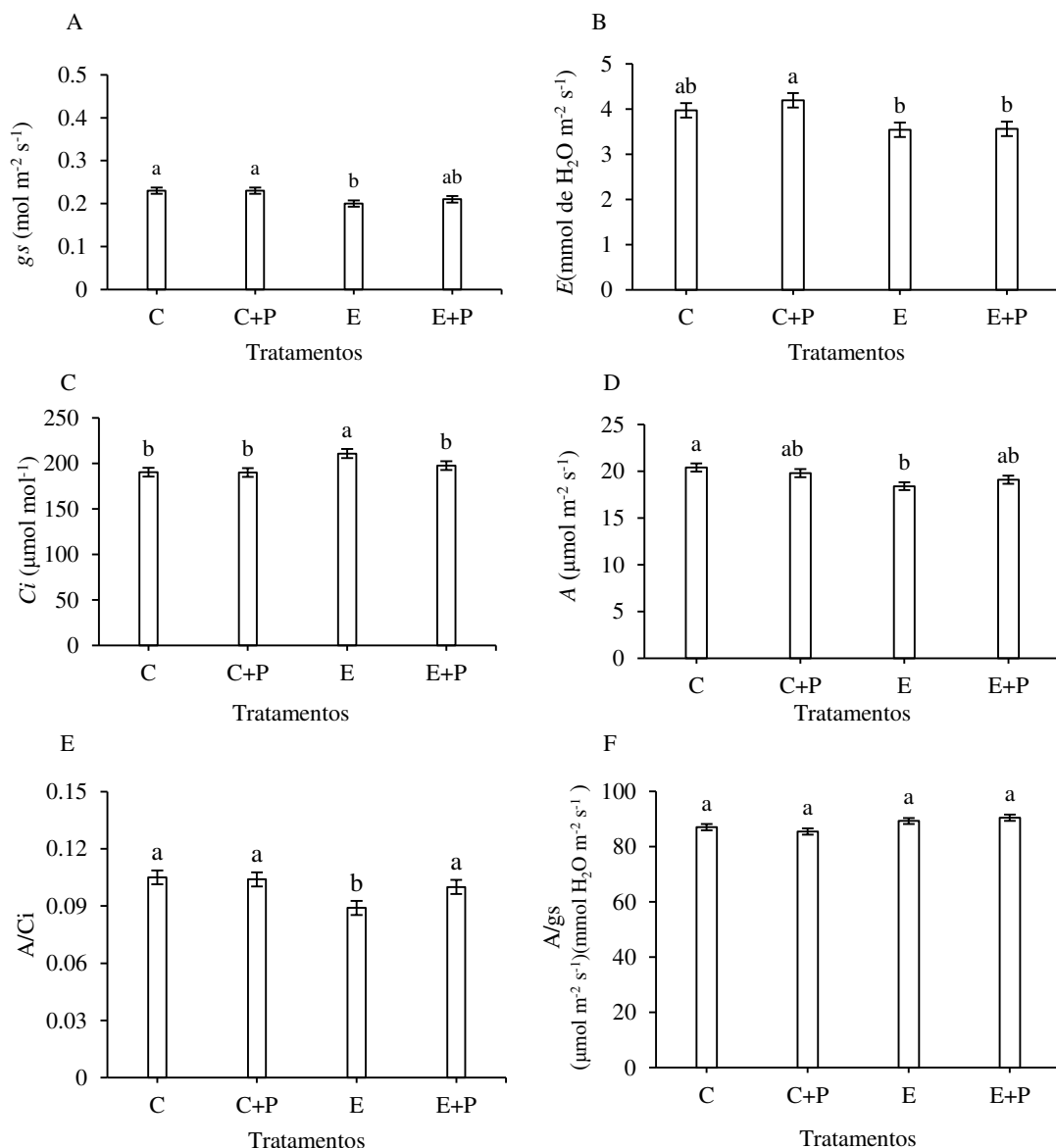
A interação genótipos e tratamentos não foi significativa para as trocas gasosas (Tabela 3). Todavia, houve diferença para tratamentos e genótipos de algodoeiro de forma isolada, sobre a condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ). Para eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ), foi registrado efeito significativo apenas para genótipos (Tabela 3).

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) em plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios					
		$g_s$	$E$	$C_i$	$A$	$A/C_i$	$A/g_s$
Genótipos (G)	2	**	**	**	**	**	*
Tratamentos (T)	3	*	**	**	*	**	ns
Interação G x T	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	-	9,38	10,1	4,57	5,83	6,27	10,78

sCV (%) - coeficiente de variação; GL - grau de liberdade; \*\*, \* e ns - Significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Nas Figuras 2A e 2B, verifica-se que não houve diferença significativa sobre a  $g_s$  e  $E$  das plantas controle (C) em relação às plantas controle que receberam ácido pirúvico (C+P). No entanto, ocorre redução de 13,04% na  $g_s$  das plantas de algodão quando submetidas ao tratamento de déficit hídrico (E), em relação ao tratamento controle (C). Todavia, o tratamento déficit hídrico + piruvato (E+P) não diferiu do controle (Figura 2A). Nesse sentido, é possível afirmar que a aplicação do ácido pirúvico aliviou os efeitos do déficit hídrico nas plantas de algodão.



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C - controle; C+P - Controle + piruvato; E - estresse e E+P - estresse + piruvato.

**Figura 2.** Condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) de algodoeiros em função dos tratamentos aos 22 DAE.

Em decorrência do fechamento parcial dos estômatos, houve redução de 10,8% na transpiração das plantas sob déficit hídrico em relação às plantas controle (Figura 2B). Essa correlação entre a  $g_s$  e  $E$  é esperada, pois a planta responde diretamente com aumento ou redução da transpiração de acordo com a abertura estomática. Segundo Taiz et al. (2017), o fechamento estomático possui o intuito de restringir a perda de água por transpiração, que é uma estratégia adaptativa das plantas sob déficit hídrico. Yi et al.

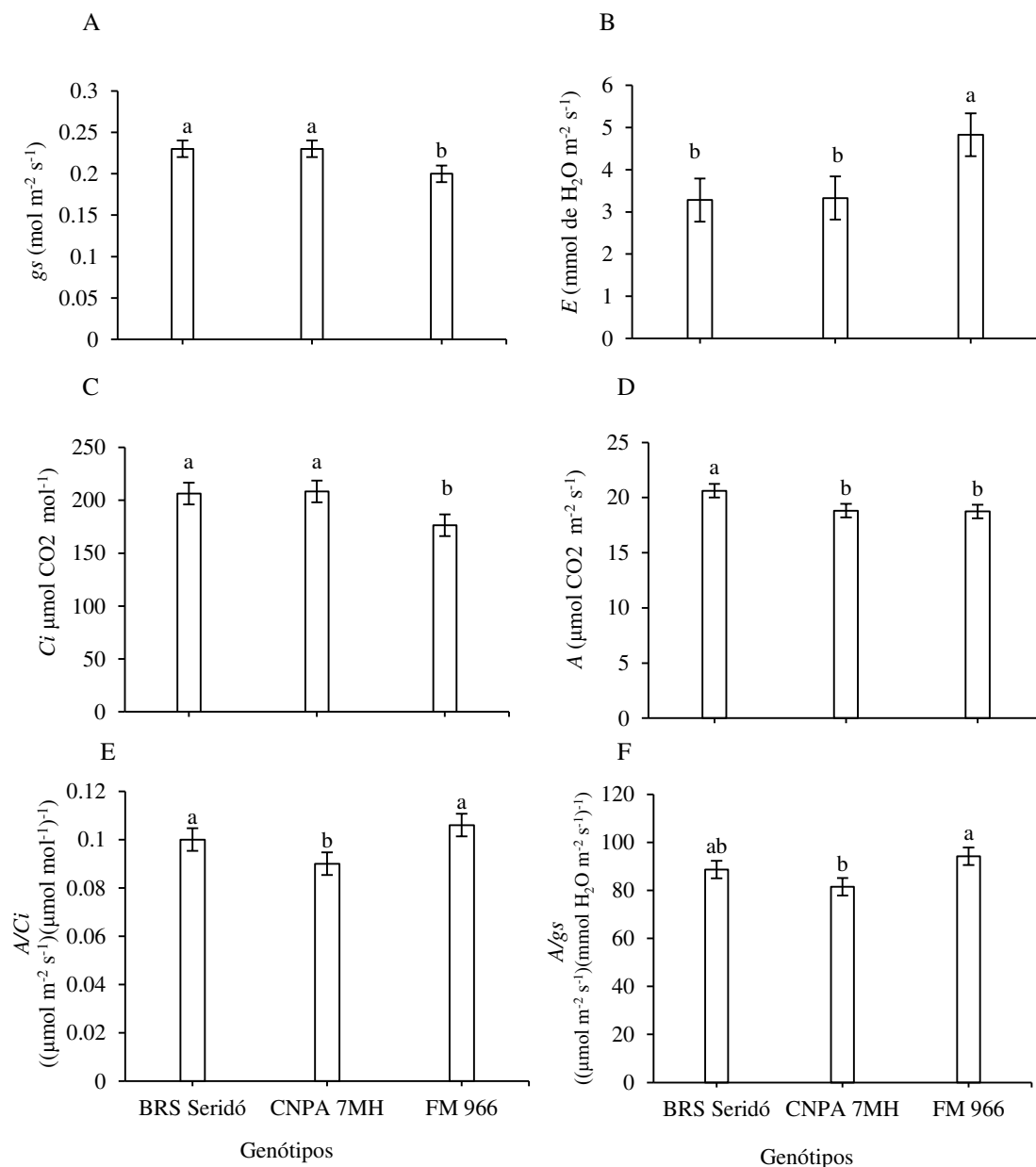
(2016), em estudo sobre os efeitos do estresse hídrico em plantas de algodão, identificaram que o déficit hídrico induziu o fechamento estomático, com redução de 62% e 80% em plantas com déficit hídrico leve e moderado em comparação com as plantas irrigadas.

A concentração interna de CO<sub>2</sub> das plantas de algodão (Figura 2C) aumentou 10,71% quando passaram pelo déficit hídrico e sem aplicação de ácido pirúvico, como consequência, redução de 9,8% na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> em comparação ao tratamento controle (Figura 2D). Possivelmente, o carbono estocado na célula subestomática não estava sendo metabolizado, o que refletiu na baixa taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>. Os autores Yi et al. (2016) constataram redução de 40% na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> em plantas com déficit hídrico moderado. E Snider et al. (2014) submetendo plantas de algodão (cultivar PHY 499 WRF) ao déficit hídrico, também encontraram um abatimento de 40% nas taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> quando o potencial hídrico do solo baixou de -0,3 MPa até 0,86 MPa. Todavia, o presente estudo, com a suplementação de ácido pirúvico, apesar de não significativo, encontrou um leve aumento (3,8%) na *A* em relação às plantas que não receberam ácido pirúvico (Figura 2D).

Tais resultados são reflexos da eficiência instantânea da carboxilação (Figura 2E), em que o tratamento com déficit hídrico e aplicação do ácido pirúvico não diferiu dos tratamentos controle, sendo positivo na metabolização do carbono que entrava na célula estomática, na produção de fotoassimilados. Para eficiência intrínseca do uso da água (*A/gs*), não foi observada diferença significativa entre os tratamentos (Figura 2 F).

É provável que o resultado seja uma evidência de maior assimilação de CO<sub>2</sub>, em relação ao CO<sub>2</sub> encontrado na câmara subestomática, pois é notório que, se a *C<sub>i</sub>* aumenta por causa da abertura dos estômatos, a relação *A/C<sub>i</sub>*, também sobe (Pereira et al., 2020). Além de um incremento de 12,3% na *A/C<sub>i</sub>* das plantas sob déficit hídrico + aplicação de piruvato em relação as que não receberam. Tais resultados refletiram em aumento nos componentes de produção (vide Figura 5), podendo-se então, identificar uma relação entre a eficiência nas trocas gasosas e a produção nas plantas.

Os genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH, detiveram as maiores médias na condutância estomática em relação ao genótipo FM 966 aos 22 DAE (Figura 3A). No entanto, a maior taxa de transpiração foi do FM 966 em relação ao BRS Seridó e CNPA 7MH que não diferiram entre si (Figura 3B).



Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C - controle; C+P - Controle + piruvato; E - estresse e E+P - estresse + piruvato.

**Figura 3.** Dados médios para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) dos genótipos de algodoeiro aos 22 DAE.

As maiores médias na  $C_i$  foram dos genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH em relação ao FM 966 (Figura 3C). Enquanto que, a maior taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  do BRS Seridó, diferindo estatisticamente dos demais genótipos estudados (Figura 3D).

Quanto a eficiência instantânea da carboxilação e a eficiência intrínseca do uso da água, os genótipos BRS Seridó e FM 966 foram mais eficientes (Figuras 3E e 3F).

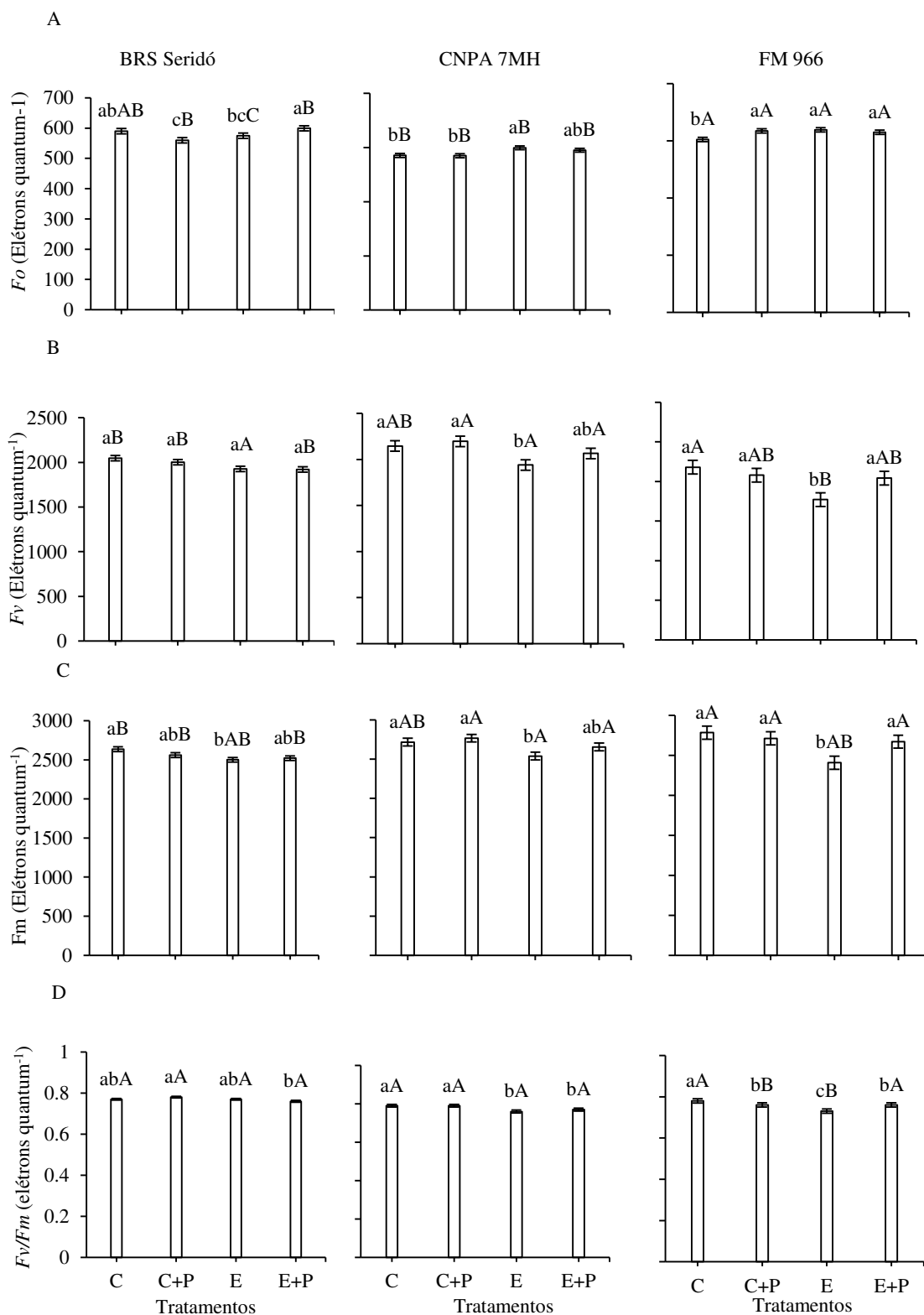
Embora as trocas gasosas sejam importantes para determinar as taxas fotossintéticas das plantas, elas podem não ser suficientes para avaliar os efeitos nocivos dos estresses abióticos nos cloroplastos (Hamani et al., 2020). Por isso, uma alternativa é a avaliação do rendimento da fluorescência da clorofila, que revela o nível de excitação da energia que dirige aos pigmentos a fotossíntese e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do fotossistema II (PSII) (Bolhàr-Nordenkamp et al., 1989). Nesse contexto, a fluorescência inicial ( $F_o$ ), máxima ( $F_m$ ), variável ( $F_v$ ) e a eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) receberam influência da interação entre os fatores ( $p \leq 0,01$ ) (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância para fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) de plantas de algodão em função dos genótipos e dos tratamentos aos 25 DAE.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios			
		$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$
Genótipos (G)	2	8096,0**	44124,1**	39056,6**	$1,0 \times 10^{-3**}$
Tratamentos (T)	3	887,0**	92800,0**	107770,1**	$1,0 \times 10^{-3**}$
Interação G x T	6	668,6**	13699,0**	16258,5**	$2,0 \times 10^{-4**}$
Bloco	2	450,3*	8252,0ns	8097,02ns	$8,0 \times 10^{-5ns}$
Resíduo	22	103,9	3467,1	3793,9	$4,0 \times 10^{-5}$
CV (%)	-	1,71	2,24	3,04	0,89

CV (%) - coeficiente de variação; GL - grau de liberdade \*\* , \* e ns - significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Houve aumento na fluorescência inicial do algodoeiro CNPA 7MH, partindo de 571 elétrons quantum<sup>-1</sup> em plantas controle (C) para 599 elétrons quantum<sup>-1</sup> em plantas sob déficit hídrico na ausência de ácido pirúvico (E), correspondendo a um acréscimo de 4,9%. Indicando que, o sistema de absorção de luz do PSII das plantas controle esteja atuando de forma eficiente. Dessa forma, o aumento na  $F_o$  das plantas sob deficiência hídrica pode ser resultado de danos no centro de reação do PSII ou da redução da capacidade de transferência da energia de excitação da antena para o centro de reação (Baker e Rosenqvst, 2004; Lima et al., 2019). Com isso, uma diminuição de 177,7 elétrons quantum<sup>-1</sup> na fluorescência máxima e 214 elétrons quantum<sup>-1</sup> na fluorescência variável quando relacionados os mesmos tratamentos. Não foi observada diferença expressiva entre o déficit hídrico na presença e ausência de ácido pirúvico (Figura 4B).



Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P - Controle + piruvato, E - estresse e E+P - estresse + piruvato.

**Figura 4.** Desdobramento da interação entre os genótipos e tratamentos aplicados para fluorescência inicial ( $F_o$ ), fluorescência máxima ( $F_m$ ), fluorescência variável ( $F_v$ ) e eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) em plantas de algodoeiro aos 22 DAE.

Em FM 966, a menor fluorescência inicial foi das plantas controle (C), diferindo dos demais tratamentos (Figura 4A). No entanto, a imposição das plantas ao déficit hídrico conteve a fluorescência máxima em 376 elétrons quantum<sup>-1</sup> e a variável em 409 elétrons quantum<sup>-1</sup> em comparação as plantas controle (Figuras 4B e 4C). Evidenciando que, a fluorescência variável está intimamente relacionada à variação de *Fo* e *Fm*. Além de poder estar relacionada à deficiência na fotorredução da quinona A, pela inativação do PSII nas membranas dos tilacóides, que afeta o fluxo de elétrons entre os fotossistemas, e, assim, menor será a capacidade da planta em transferir energia para a formação de NADPH, ATP e ferredoxina reduzida provocando menor capacidade de assimilação do CO<sub>2</sub> na fase bioquímica da fotossíntese (Baker, 2008; Lima et al., 2019).

Apesar da diferença entre os tratamentos para a eficiência quântica máxima do PSII (Figura 4D) em plantas de BRS Seridó e CNPA 7MH, ambos os genótipos tiveram rendimento quântico máximo do PSII semelhantes e compreendidos entre os valores considerados ideais para as plantas em condições normais de cultivo, uma vez que, a faixa ideal da relação *Fv/Fm* para a maioria das plantas cultivadas reside entre 0,75 e 0,84 elétrons quantum<sup>-1</sup>, ou seja, a deficiência hídrica no solo não causou danos ao aparato fotoquímico desses materiais (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989). Apontando que, o PSII desses genótipos é estável durante o déficit hídrico, e pode ter permitido esses materiais genéticos resistirem a tais condições (Yi et al., 2016).

No entanto, nas plantas do genótipo FM 966, sob déficit hídrico houve redução na relação *Fv/Fm* a 0,73 elétrons quantum<sup>-1</sup> (Figura 4D). Desse modo, fica evidente que ocorreu dano no PSII desse genótipo, pois, o valor máximo para razão *Fv/Fm* ficou abaixo de 0,75 elétrons quantum<sup>-1</sup>. Isso pode ser indicio da sensibilidade do FM 966 ao déficit hídrico em relação aos genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH que são materiais oriundos de cruzamento do algodão mocó e adaptados para o semiárido, enquanto que, o FM 966 apesar de ser altamente produtivo é favorável nas condições do cerrado. De acordo com Las Rivas & Barber (1997), a perda de atividade do PSII nas espécies sensíveis está associada à diminuição da capacidade de reoxidação das quinonas, resultando em menor eficiência no transporte de elétrons para o PSI.

O rendimento quântico máximo do PSII, estimado pela razão *Fv/Fm*, expressa a eficiência de captura da energia de excitação pelos centros de reação abertos do PSII e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do fotossistema II (PSII) (Bolhàr-Nordenkampf et al., 1989). Para Yeates (2014),

no início do déficit hídrico, o aparato fotossintético do algodoeiro pode continuar em atividade para garantir fotoassimilados para a divisão celular, o que corrobora com os dados deste trabalho. No entanto, com o aumento do estresse hídrico os eventos nos tilacóides são afetados e, com isso, há interferência na eficiência da fotossíntese e inativação do fotossistema PSII e da cadeia de transporte de elétrons que daria origem a ATP e NADPH<sub>2</sub> (Krause e Weiss, 1991). Todavia, no presente estudo, a aplicação de ácido pirúvico favoreceu a relação  $Fv/Fm$  nas plantas do FM 966 sob déficit hídrico, com valor médio de 0,76 elétrons quantum<sup>-1</sup>.

Na tabela 5, observa-se que o número de capulhos (Ncap), massa de capulhos por planta (Mcap) e a produção de algodão em caroço foram influenciados ( $p \leq 0,01$ ) pela interação entre os fatores genótipos  $\times$  tratamentos.

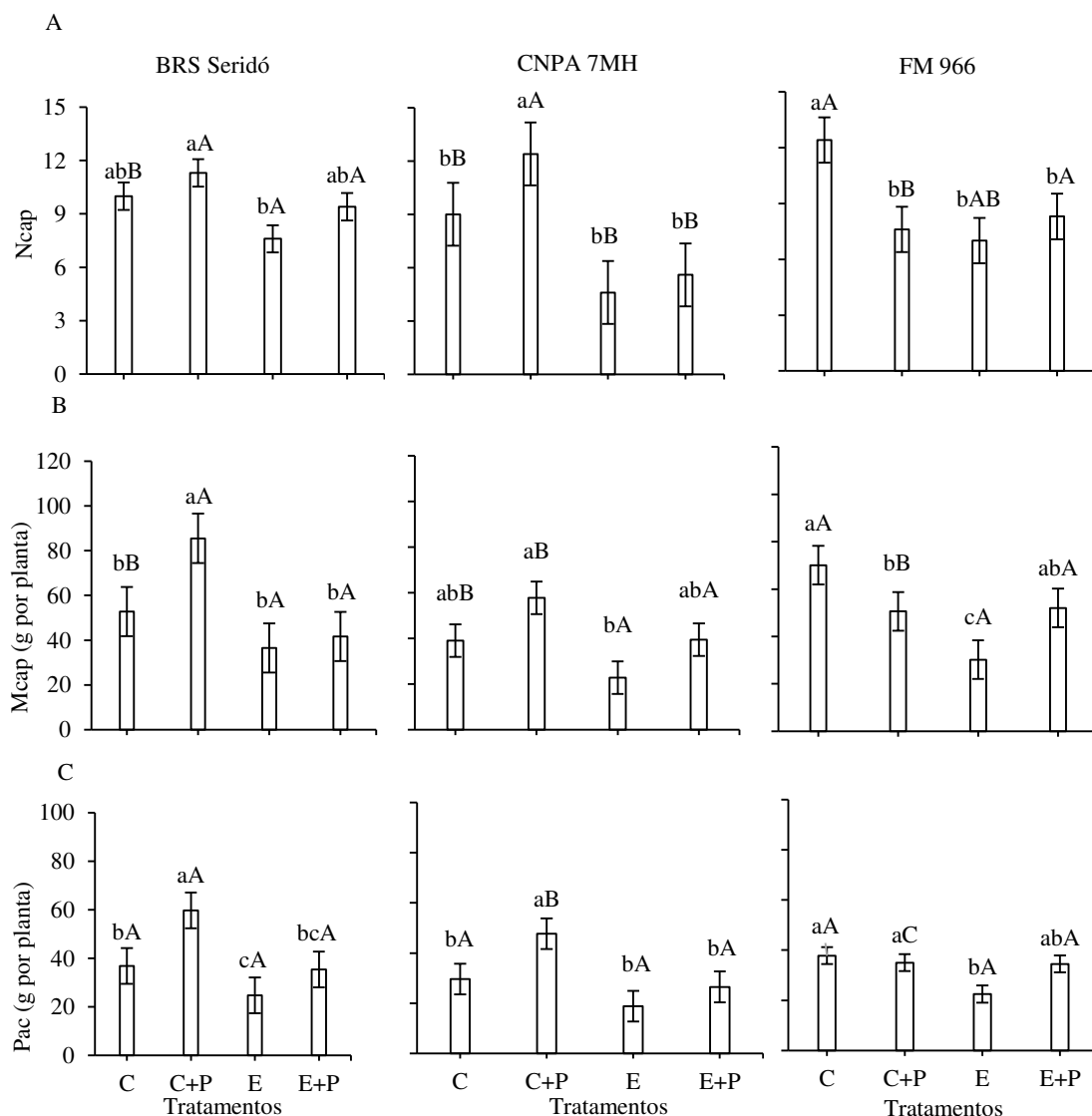
**Tabela 5.** Resumo da análise de variância para número de capulhos por planta (Ncap), massa de capulhos por planta (Mcap), produção de algodão em caroço (Pac) e produtividade da água (Yw) de plantas de algodão em função dos genótipos e dos tratamentos aos 120 DAE.

Fonte de variação	GL	Quadrados médios			
		Ncap	Mcap	Pac	Yw
Genótipos (G)	3	8,36**	677,4**	242,0**	1,073**
Tratamentos (T)	2	36,46**	1669,1**	988,4**	1,018**
Interação G x T	6	12,79**	451,5**	125,3**	0,011ns
Bloco	2	3,21 <sup>ns</sup>	3088,25*	157,2*	0,161**
Resíduo	22	1,39	69,88	28,4	0,027
CV (%)		13,4	17,3	15,6	15,6

CV (%) - coeficiente de variação; GL - grau de liberdade \*\* , \* e ns - significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

As plantas do genótipo BRS Seridó submetidas ao estresse hídrico não diferiram das plantas controle para o Ncap e Mcap por planta. No entanto, as plantas controle quando receberam a aplicação do ácido pirúvico alcançaram maior média na massa de capulhos por planta (85,5 g), diferindo estatisticamente dos demais tratamentos.





Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – Controle + piruvato, E – estresse e E+P – estresse + piruvato.

**Figura 5.** Desdobramento da interação entre os genótipos e os tratamentos para número de capulhos (Ncap), massa de capulhos por plantas (Mcap) e produção de algodão em caroço (Pac) de algodoeiros aos 120 DAE.

Em CNPA 7MH (Figura 5A), o maior Ncap foi das plantas controle que receberam aplicação de ácido pirúvico (C+P), com incremento de 37,7% em relação as plantas controle ausente de ácido pirúvico (C). A redução no número de capulhos nos tratamentos E e E+P em relação ao C+P foi de 62,9 e 54,8%, respectivamente. Para Mcap, as plantas do tratamento C+P foram superiores aos demais tratamentos, porém, com diferença

significativa apenas nas plantas do tratamento estresse hídrico e ausência de ácido pirúvico (E) (Figura 5B).

Resultados contrários foram observados no algodoeiro FM 966 (Figura 4A), em que, a aplicação do ácido pirúvico em plantas controle não subsidiou aumento no número de capulhos e na massa de capulho por planta. Porém, a contenção no número de capulho nos tratamentos E e E+P foram 43,5 e 33,06%, respectivamente, em relação ao tratamento controle (C), provavelmente, porque o déficit hídrico promoveu queda de botões florais, abortamento de flores e/ou queda de maçãs, acarretando menor produção de capulhos por planta.

Esses resultados corroboram com os de Almeida et al. (2017) que também constataram reduções no número de capulhos em plantas de algodão sob estresse hídrico. Segundo Yeates (2014), o déficit hídrico reduz o fornecimento de carboidrato devido à menor taxa fotossintética, causando assim, o abortamento, por conta da necessidade de acúmulo de carboidratos ser atingida mais rapidamente do que em uma planta não estressada. Todavia, com o fornecimento exógeno de piruvato, constatou-se aumento de 72% nas plantas de algodão sob o tratamento E+P em relação ao tratamento E (Figura 4A). Possivelmente, a aplicação do ácido pirúvico contribuiu para um maior aporte energético durante o estresse hídrico, uma vez que, se observou tendência de aumento nos parâmetros de trocas gasosas.

De acordo com a Figura 5C, o BRS Seridó possui a maior produção de algodão em caroço (Pac) em plantas do tratamento C+P (47,7 gramas), enquanto que a menor Pac (24,7 g) nas submetidas ao tratamento estresse hídrico e ausência de ácido pirúvico (E). No entanto, as plantas que foram expostas ao estresse hídrico e receberam aplicação de ácido pirúvico (E+P) não diferiram estatisticamente das plantas controle (C).

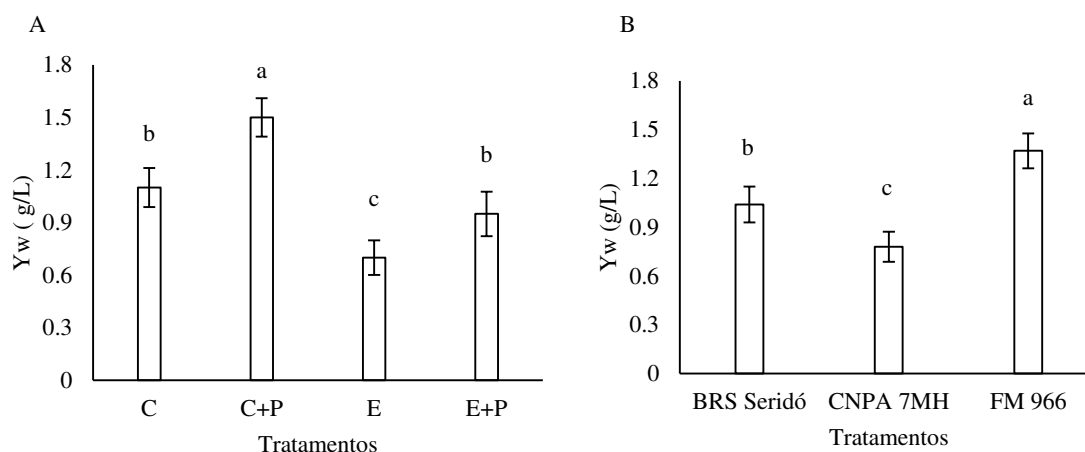
Para o genótipo CNPA 7MH, a aplicação de ácido pirúvico em plantas controle, também subsidiou maior produção de algodão em caroço, com incremento de 29,6% em relação as plantas controles na ausência de piruvato. Além disso, não foi encontrada diferença significativa entre o controle (C) e as plantas submetidas ao estresse hídrico na fase vegetativa (E e E+P) (Figura 5C). Em se tratando desse genótipo, o estresse hídrico nesse estágio, pode ter reduzido o crescimento vegetativo e a produção de posições frutíferas para preservar os assimilados para a formação dos frutos. Yeates (2014) cita ainda que, o estresse por falta de água será mais importante durante a produção de botões florais, já que a planta precisa estabelecer um dossel e um número de botões suficiente para ter um potencial produtivo alto.

Em FM 966, diferente dos genótipos anteriores, não houve aumento na produção de algodão em caroço em função da aplicação de ácido pirúvico nas plantas controle, no entanto, as plantas que passaram por estresse hídrico e que receberam aplicação de ácido pirúvico (E+P) não diferiram das plantas sob os tratamentos C e C+P. Além disso, houve redução de 40,7% na produção de algodão nas plantas do tratamento E em relação as plantas C (Figura 5C).

Ao comparar os genótipos de algodoeiro dentro de cada tratamento, em condições de irrigação plena (tratamento controle), as plantas do FM 966 produziram maior número de capulhos e maior massa de capulhos por planta, entretanto, para produção de algodão em caroço não houve diferença. Mas, quando as plantas controle dos genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH receberam ácido pirúvico, obtiveram maior número de capulhos, massa de capulhos por planta e produção de algodão em caroço (Figura 5A, B e C).

Em condições de estresse hídrico e ausência da aplicação de ácido pirúvico (E), BRS Seridó e FM 966 chegaram ao maior número de capulhos por planta, por outro lado, não houve diferença na massa de capulhos nem na produção de algodão em caroço. As plantas do mesmo tratamento quando receberam ácido pirúvico, aumentaram a produção de capulhos em BRS Seridó e FM 966, enquanto que para massa de capulhos por planta e produção não houve diferença entre os genótipos estudados (Figura 5A, B e C).

A aplicação de ácido pirúvico em plantas controles (C+P) aumentou em 36,3% a produtividade da água ( $Y_w$ ) em relação às plantas controle na ausência de ácido pirúvico (C). Já com aplicação do ácido pirúvico em plantas sob déficit hídrico houve aumento de 35,7% em relação às plantas sob déficit hídrico na ausência de ácido pirúvico (Figura 6A). Em relação aos genótipos de forma isolada, observou-se maior produtividade da água com o genótipo FM 966, aumentando em 31,7% em relação ao BRS Seridó e 75,6% em relação ao CNPA 7MH (Figura 6B).



Letras minúsculas iguais nas barras não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – Controle + piruvato, E – estresse e E+P – estresse + piruvato.

**Figura 6.** Produtividade da água ( $Y_w$ ) de algodoeiro em função dos tratamentos (A) e dos genótipos (B).

Em geral, é evidente o efeito benéfico do piruvato, como decorrente da suplementação de um fator energético, o ácido pirúvico, que no ciclo de Krebs vai se transformar em ATP. No metabolismo celular, ele é originado da oxidação da molécula de glicose, no fenômeno denominado de glicólise, em que são formadas duas moléculas de piruvato (Taiz et al., 2017). Tudo indica que, a sua aplicação em plantas de BRS Seridó e CNPA 7MH em estado normal contribuiu para um maior aporte energético nos processos fisiológicos da planta pela tendência de aumento na  $gs$ ,  $E$ ,  $A$ , refletindo na produção.

Em trabalho conduzido por Barbosa et al (2021), a aplicação exógena de 50 mM de piruvato contribuiu para mitigar os efeitos do estresse hídrico em plantas de amendoim, cultivar IAC Caiapó (sensível à seca), e restaurou a ação de enzimas antioxidantes na cultivar em BR-1 (tolerante à seca), com base em mensurações de SOD (45%), CAT (129%) e APX (60%) em plantas estressadas.

Na Tabela 7, a matriz de correlação entre as variáveis, as que apresentam valores positivos são diretamente proporcionais e as com valores negativos são inversamente proporcionais. As correlações acima de 0,9 são consideradas muito fortes; entre 0,7 e 0,9 forte, entre 0,5 e 0,7 moderada, entre 0,3 e 0,5 fraca e entre 0 e 0,3 desprezível. Neste estudo, a maioria das variáveis se correlacionaram entre forte e muito forte.

**Tabela 6.** Matriz de correlação entre as variáveis

	Pac	Ncap	Mcap	Yw	gs	E	Ci	A	A/Ci	A/gs	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
Pac	1													
Ncap	0.85	1												
Mcap	0.98	0.94	1											
Yw	0.99	0.87	0.98	1										
gs	0.85	1.00	0.94	0.87	1									
E	0.89	0.93	0.93	0.93	0.93	1								
Ci	-0.87	-0.95	-0.95	-0.86	-0.95	-0.82	1							
A	0.81	0.99	0.92	0.82	0.99	0.85	-0.98	1						
A/Ci	0.82	0.92	0.91	0.80	0.92	0.75	-0.99	0.96	1					
A/gs	-0.78	-0.84	-0.81	-0.84	-0.84	-0.97	0.66	-0.73	-0.57	1				
Fo	-0.74	-0.93	-0.83	-0.80	-0.93	-0.96	0.77	-0.87	-0.71	0.95	1			
Fm	0.79	0.95	0.90	0.78	0.95	0.78	-0.99	0.99	0.99	-0.62	-0.78	1		
Fv	0.80	0.97	0.91	0.80	0.96	0.81	-0.99	0.99	0.98	-0.67	-0.81	1.00	1	
Fv/Fm	0.85	1.00	0.94	0.87	1.00	0.93	-0.95	0.99	0.92	-0.84	-0.93	0.95	0.96	1

A massa de capulhos por planta (Mcap) e a produtividade da água (Yw), apresentaram uma correlação muito forte com a produção de algodão em caroço (Pac) sendo diretamente proporcional. O número de capulhos (Ncap), condutância estomática (gs), transpiração (E), taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A), eficiência instantânea da carboxilação (A/Ci), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv) e a eficiência quântica máxima do PSII ((Fv/Fm) estabeleceram uma correlação forte com a produção de algodão em caroço (Pac) sendo diretamente proporcional, ou seja, a medida que essas variáveis aumentaram, houve elevação na Pac (Tabela 7).

A concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), a eficiência intrínseca do uso da água e a fluorescência inicial, também com correlação forte com a produção de algodão em caroço (Pac), porém de forma inversamente proporcional, ou seja, a medida que houve aumento, também se instaura uma redução na produção de algodão em caroço e em todas as demais variáveis estudadas (Tabela 6). Isso se explica pelo aumento na Ci, que representa uma quantidade expressiva de carbono célula, mas não está sendo metabolizado. A fluorescência inicial alta, significa que a planta está passando por situações adversas e que provavelmente, está ocorrendo algum dano no PSII.

É interessante notar que a Ci, A/gs e Fo, se correlacionam de forma diretamente proporcional, uma aumenta e a outra também e vice-versa.

## CONCLUSÕES

A aplicação de ácido pirúvico é eficiente em minorar os efeitos do déficit hídrico sobre as trocas gasosas na fase vegetativa do algodoeiro.

O genótipo BRS Seridó, cultivado sob irrigação plena, quando aplicado ácido pirúvico obtém maior produção de algodão em caroço.

O algodoeiro FM 966 é sensível ao déficit hídrico na fase vegetativa, com reduções na fluorescência variável, fluorescência máxima, massa de capulhos e na produção de algodão em caroço.

A produtividade da água em algodoeiros sob déficit hídrico é beneficiada pela aplicação foliar de ácido pirúvico

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, a Coordenação de Desenvolvimento e Aperfeiçoamento de Pessoal – CAPES pela bolsa concedida e a Embrapa Algodão pelo espaço concedido para realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS CITADAS

- Almeida, E. S. A. B.; Pereira, J. R.; Azevedo, C. A. V.; Araújo, W. P.; Zonta, J. H.; Cordão, M. A. Algodoeiro herbáceo submetido a déficit hídrico: Produção. *ACSA*, v.13, p.22-28, 2017.
- Alves, F. A. L.; Cavalcante, F. S.; Oliveira-Júnior, I. S.; Ferraz, I.; Siqueira, S. M. Competição de variedades de algodão herbáceo para cultivo no agreste pernambucano. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, v.24, p.1-8, 2019. <https://doi.org/10.12661/pap.2019.003>
- Baker, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, v.59, p.89-113, 2008. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Baker, N. R.; Rosenqvist, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, v.55, p.1607-1621, 2004. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- Barbosa, D. D.; Fernandes, P. D.; Marcelino, A. D. A. de L.; Silva, F. de A.; Dias, M. dos S.; Silva, C. R. C.; Santos, R. C. Exogenous pyruvate mitigates the detrimental effects of water stress in contrasting peanut genotypes. *Genetics and Molecular Research*. v.20, p.1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr18907>
- Bolhàr-Nordenkampf, H. R.; Long, S. P.; Baker, N. R.; Öquist, G.; Schreider, U.; Lechner E. G. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves

- in the field: a review of current instrumentation. *Functional Ecology*, v.3, p. 497-514, 1989. <https://doi.org/10.2307/2389624>
- CONAB - Acompanhamento da safra brasileira de grãos, sétimo levantamento, v.9, 2022. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acessado: 07/06/2022.
- Chaves, M. M.; Flexas, J.; Pinheiro, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, v.103, p.551-560, 2009. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- De Las Rivas, J.; Barber, J. Structure and thermal stability of photo system II reaction centers studied by infrared spectroscopy. *Biochemistry*, v.36, p.8897-8903, 1997. <https://doi.org/10.1021/bi970684w>
- Deeba, F., Pandey, A. K., Ranjan, S., Mishra, A., Singh, R., Sharma, Y. K., Shirke, P.A., Pandey, V. Physiological and proteomic responses of cotton (*Gossypium herbaceum* L.) to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, v.53, p.6-18, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.01.002>
- Denaxa, N. K.; Damvakaris, T.; Roussos, P. A. Antioxidant defense system in young olive plants against drought stress and mitigation of adverse effects through external application of alleviating products. *Scientia Horticulturae*, v.259, p.108812, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108812>
- Farahani, H. J.; Oweis, T. Y.; Izzi, G. Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. *Irrigation science*, v.26, p.375-383, 2008. DOI: <https://hdl.handle.net/20.500.11766/7814>
- Ferreira, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v.37, p.529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Foyer, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and experimental botany*, v.154, p.134-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>
- Hamani, A. K. M.; Wang, G.; Soothar, M. K.; Shen, X.; Gao, Y.; Qiu, R.; Mehmood, F. Responses of leaf gas exchange attributes, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in NaCl-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings to exogenous glycine betaine and salicylic acid. *BMC Plant Biology*, v.20, p.1-14, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02624-9>
- Kerbauy, G. B. *Fisiologia vegetal*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p.
- Krause, G. H.; Weis, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review Plant Physiology. Plant Molecular Biology*, v.42, p.313-349, 1991. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.001525>
- Lima, G. S. de.; Dias, A. S.; Soares, L. A. A. dos.; Gheyi, H. R. ; Nobre, R. G. ; Silva, A. A. R. da. Eficiência fotoquímica, partição de fotoassimilados e produção do algodoeiro

- sob estresse salino e adubação nitrogenada. Revista de Ciências Agrárias, v.43, p.214-225, 2019. <https://doi.org/10.19084/RCA18123>
- Niu, J.; Zhang, S.; Liu, S.; Ma, H.; Chen, J.; Shen, Q.; Zhao, X. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress. Journal of plant physiology, v.224, p.30-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.001>
- Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: Embrapa-SEA. 1991, p.189-253.
- Pereira, E. R. de L.; Medeiros, M. B. de.; Suassuna, J. F.; Morais, V. M. M.; Fernandes, H. F.; Lima, A. S. de.; N. S. da Costa.; Fernandes, P. D. Resposta fisiológica do algodão colorido em estresse salino. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v.7, p.653-664, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071613](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071613)
- Santos, T. B. dos.; Ribas, A. F.; Souza, S. G. H. de.; Budzinski, I. G. F.; Domingues, D. S. Physiological Responses to Drought, Salinity, and Heat Stress in Plants: A Review. Stresses, v.2, p.113-135, 2022.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T.; Abdul-Wajid, H. H.; Battaglia, M. L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants, v.10, p.259, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shen, J. L.; Li, C. L.; Wang, M.; He, L. L.; Lin, M. Y.; Chen, D. H.; Zhang, W. Mitochondrial pyruvate carrier 1 mediates abscisic acid-regulated stomatal closure and the drought response by affecting cellular pyruvate content in *Arabidopsis thaliana*. BMC plant biology, v.17, p.217, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1175-3>
- Snider, J. L.; Collins, G. D.; Whitaker, J.; Perry, C. D.; E Chastain, D. R. Electron transport through photosystem II is not limited by a wide range of water deficit conditions in field-grown *Gossypium hirsutum*. Journal of Agronomy and Crop Science, v.200, p.77-82, 2014. <https://doi.org/10.1111/jac.12044>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, D.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília: Embrapa. 2017. 573p.
- Ul-Allah, S.; Rehman, A.; Hussain, M.; Farooq, M. Fiber yield and quality in cotton under drought: Effects and management. Agricultural Water Management, v.255, p.106994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106994>
- Yeates, S. Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro. In: ECHER, F. R. (Ed). O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes. Cuiabá: Instituto Mato-Grossense do Algodão – IMAmt, v.1, p.63-79, 2014



- Yi, X. P.; Zhang, Y. L.; Yao, H. S.; Luo, H. H.; Gou, L.; Chow, W. S.; Zhang, W. F. Rapid recovery of photosynthetic rate following soil water deficit and re-watering in cotton plants (*Gossypium herbaceum* L.) is related to the stability of the photosystems. *Journal of Plant Physiology*, v.194, p.23-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.016>
- Zonta, J. H.; Brandão, Z. N.; Sofiatii, V.; Bezerra, J. R. C.; Medeiros, J. C. Irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in semi-arid environment. *Australian Journal of Crop Science*, v.10, p.118-126, 2016.
- Zwart, S. J.; Bastiaanssen, W. G. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural water management*, v.69, p.115-133, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>

**CAPÍTULO III: ÁCIDO PIRÚVICO NA INDUÇÃO A TOLERÂNCIA DO  
ALGODOEIRO AO DÉFICIT HÍDRICO NO FLORESCIMENTO**

---

## ÁCIDO PIRÚVICO NA INDUÇÃO A TOLERÂNCIA DO ALGODOEIRO AO DÉFICIT HÍDRICO NO FLORESCIMENTO

**Resumo:** objetivou-se avaliar a morfofisiologia e produção de três genótipos de algodoeiro submetidos a déficit hídrico e aplicação foliar de ácido pirúvico no florescimento da cultura. O experimento foi conduzido em condições de ambiente protegido da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão, em Campina Grande, PB. Três genótipos de algodão (BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966), foram submetidos a quatro tratamentos na fase de florescimento (C- controle, C+P - controle mais aplicação foliar de ácido pirúvico, E - déficit hídrico e E+P - déficit hídrico e aplicação foliar de ácido pirúvico), distribuídos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial (3×4) com três repetições, perfazendo 36 unidades experimentais, sendo composta por 2 plantas cada. Para tanto, avaliou-se as trocas gasosas, a eficiência fotoquímica, o crescimento e os componentes de produção. O déficit hídrico no florescimento da cultura reduz com maior intensidade o número de capulhos, massa de capulhos, produção de algodão em caroço e a produtividade da água do algodoeiro FM 966 em relação a BRS Seridó e CNPA 7MH. A aplicação foliar de ácido pirúvico minora os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) em plantas do genótipo CNPA 7MH. A produtividade da água do algodoeiro sob condições normais de cultivo, aumenta com a aplicação foliar de ácido pirúvico.

**Palavras-chave:** *Gossypium hirsutum* L., estresse abiótico, trocas gasosas, produtividade da água, eficiência fotoquímica.

## PYRUVIC ACID IN INDUCING COTTON TOLERANCE TO WATER DEFICIT AT FLOWERING

**Abstract:** The objective was to evaluate the morphophysiology and production of three cotton genotypes subjected to water deficit and foliar application of pyruvic acid during flowering. The experiment was carried out in conditions of a protected environment of the Brazilian Agricultural Research Corporation – Embrapa Algodão, in Campina Grande, PB. Three cotton genotypes (BRS Seridó, CNPA 7MH and FM 966) were submitted to four treatments in the flowering phase (C- control, C+P - control plus foliar application of pyruvic acid, E - water deficit and E+P - water deficit and foliar application

of pyruvic acid), distributed in a randomized block design in a factorial scheme (3×4) with three replications, totaling 36 experimental units, consisting of 2 plants each. For this purpose, gas exchange, photochemical efficiency, growth and production components were evaluated. The water deficit in the flowering of the crop reduces with greater intensity the number of bolls, mass of bolls, seed cotton production and the water productivity of cotton FM 966 in relation to BRS Seridó and CNPA 7MH. Foliar application of pyruvic acid reduces the deleterious effects of water deficit on maximum PSII quantum efficiency (Fv/Fm) and PSII photochemical efficiency (Fv/Fo) in plants of the CNPA 7MH genotype. Cotton water productivity under normal growing conditions increases with foliar application of pyruvic acid.

**Keywords:** *Gossypium hirsutum* L., abiotic stress, gas exchange, water productivity, photochemical efficiency.

## INTRODUÇÃO

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das principais commodities exploradas comercialmente na região semiárida brasileira, movimentando diversos setores da economia, gerando empregos e renda, mas, infelizmente os rendimentos da cultura estão diminuindo constantemente devido aos efeitos prejudiciais das mudanças climáticas, sobretudo, a seca, que tem se tornado o fator ambiental que mais limita a produtividade da cotonicultura em regiões áridas e semiáridas (Niu et al., 2018; Ul-Allah et al., 2021; Shiraku et al., 2022).

Diante de tais condições, o grande desafio dos produtores é aumentar a produtividade dessa cultura em áreas marginais, em que as chuvas são irregulares ou insuficientes para atender a demanda hídrica da cultura. A espécie requer boa distribuição da pluviosidade, pois a exigência hídrica é de 550-600 mm anual (Zwart e Bastiaansen, 2004; Farahani, 2008) e a fase de maior sensibilidade da cultura se inicia durante o período de floração (Zonta et al., 2017).

A limitação de água no solo nessa fase fenológica restringe as trocas gasosas, o metabolismo de carboidratos, atividade de várias enzimas, incluindo a invertase vacuolar e a sacarose sintase, bem como na translocação de assimilados para os tecidos reprodutivos, levando ao mau funcionamento do pólen, falha reprodutiva e qualidade inferior da fibra e, portanto, redução do rendimento agrícola (Ul-Allah et al., 2021).

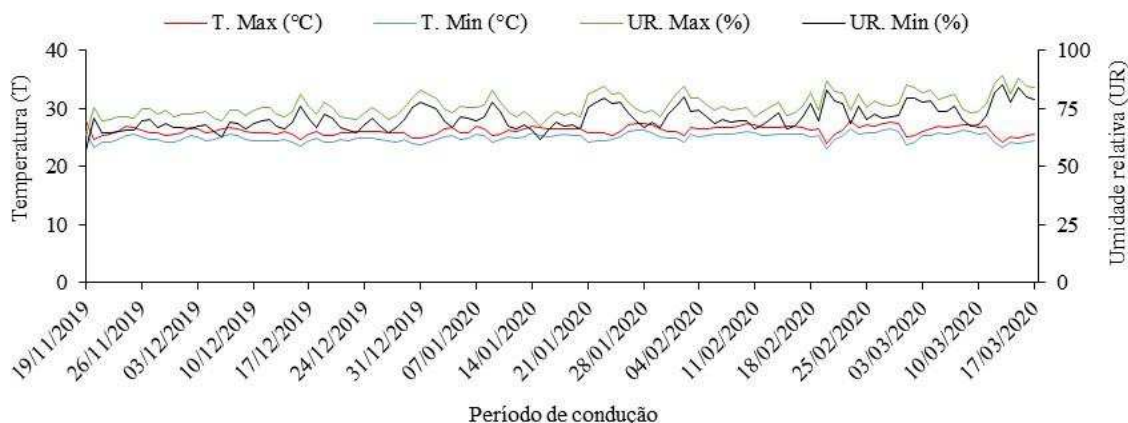
Tendo em vista os danos promovidos pelo déficit hídrico, há necessidade de se identificar alternativas que atenuem os efeitos deletérios da limitação hídrica sob o rendimento dos vegetais. Nesse sentido, o ácido pirúvico é um dos produtos que podem ser utilizados, pois no metabolismo das plantas participa do processo glicólise, processo que consiste na quebra da molécula da glicose em duas moléculas de ácido pirúvico, essenciais no metabolismo do ciclo de Krebs e na cadeia respiratória, resultando na produção de moléculas de ATP, vitais para o desenvolvimento das plantas (Kerbaui, 2008; Taiz et al., 2017). A aplicação exógena desse produto pode disponibilizar mais moléculas de piruvato às células, assim, parte da energia que seria gasta na glicólise para a produção de ácido pirúvico será empregada em processos de adaptação ao estresse hídrico, o que motivou a hipótese dessa pesquisa.

Nos últimos anos começaram pesquisas com piruvato, visando atenuação do estresse hídrico. Em trabalho realizado na China (Shen et al., 2017), os autores incubaram folhas de *Arabidopsis* por um período de 2,5 h em piruvato em concentrações de 10, 100 e 1000  $\mu\text{M}$  e descobriram que, na concentração de 100  $\mu\text{M}$ , o piruvato aumentou a corrente aniônica nas células-guarda, induzindo o fechamento estomático. Com base nesse trabalho, Barbosa et al. (2021) aprofundaram estudos em amendoim sob estresse hídrico, e verificaram que, ele contribuiu para restaurar a ação das enzimas antioxidantes SOD (45%), CAT (129%) e APX (60%) quando aplicado na concentração de 50 mM.

Diante desse contexto, objetivou-se avaliar a morfofisiologia e produção de três genótipos de algodoeiro submetidos ao déficit hídrico e aplicação foliar de ácido pirúvico no florescimento da cultura.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa algodão, localizada no município de Campina Grande, estado da Paraíba, Brasil (06° 48' 50" S e 37° 56' 31" W e altitude de 550 m). Os dados climáticos durante a execução do experimento foram coletados na estação meteorológica da Embrapa e encontram-se na Figura 1.



**Figura 1.** Temperatura máxima (T.Max), mínima (T.Min), umidade relativa do ar máxima (UR.Máx) e mínima (UR.Mín) durante a execução da pesquisa.

Três genótipos de algodoeiros - BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966 - foram submetidos a quatro tratamentos (C - controle, (C+P) – controle + ácido pirúvico; E – restrição hídrica e E+P - restrição hídrica + ácido pirúvico. A suspensão da irrigação iniciou quando 80% do stand de plantas apresentavam um botão floral e aplicação foliar com ácido pirúvico (100  $\mu$ M) no quarto, quinto e sexto dia após o início da suspensão da irrigação. As plantas que não foram suplementadas com piruvato, receberam aplicação de água destilada na mesma proporção da solução de piruvato, visando comparar os resultados dos dois tratamentos.

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial 3 $\times$ 4, com três repetições, perfazendo 36 unidades experimentais, cada uma composta por duas plantas, totalizando 72 plantas.

As plantas foram conduzidas em vasos plásticos (33 cm  $\times$  25 cm), dispostos em linhas espaçadas de 1,0 m entre si e 0,5 m dentro de cada linha, forrados com uma tela fina na parte inferior para evitar a perda de solo e uma camada de 3,0 cm de brita para evitar obstrução do dreno pelo material de solo, uma mangueira inserida na parte inferior do vaso e acoplada a um recipiente plástico com capacidade de 2,0 L para coletar água de drenagem.

Os lisímetros foram preenchidos com 25,0 dm<sup>3</sup> de material de solo (Neossolo Regolítico) coletado no município de Campina Grande, área do Agreste paraibano, cujos atributos químicos e físicos determinados em laboratório, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), Tabela 1.

**Tabela 1.** Atributos químicos e físico-hídricos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCG), Campina Grande, PB

pH	P	K	Ca	Na	Mg	Al	H	SB	CTC	v	m	MO
5,79	mg dm <sup>-3</sup>	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....%	.....	g dm <sup>-3</sup>
	0,1	0,13	0,88	0,06	1,0	0,52	1,28	2,07	3,87	53,48	20,07	6,2
	Granulometria			D. do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Porosidade (%)	P. matriciais (atm)		Umidade (%)	Água disponível (%)			
	Areia	Silte	Argila					0,10	9,19			
	.....(%).....											
	92,07	6,03	1,90	1,63	40,29				5,37			
	Classificação							15,00	3,82			
	Areia franca											

CTC a pH 7,0; Extração: Água (pH); Mehlich (P, K, Na); KCl 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al).

Antes da semeadura, a umidade do solo foi elevada ao nível correspondente próximo ao da capacidade de campo por meio do método de saturação por capilaridade seguida por drenagem. Na semeadura, distribuiu-se quatro sementes por lisímetro na profundidade de 1,5 cm. Aos 10 dias após a emergência (DAE), foi feito o desbaste, deixando duas plantas por vaso, as mais vigorosas.

Momentos antes da aplicação foliar, a solução de piruvato (100 µM) foi obtida a partir da diluição de 6,9 µL de ácido pirúvico em 1,0 L de água destilada. As pulverizações das plantas foram realizadas ao final da tarde com auxílio de um borrifador. Visando evitar deriva durante as pulverizações, as plantas foram protegidas com plástico; e o solo coberto com uma manta. A concentração de piruvato foi baseada no trabalho de Shen et al. (2017).

Ao final do período de suspensão da irrigação, retirou-se amostras de solo com auxílio de um mini-trado, em seguida, colocadas em latas de alumínio e pesadas, obtendo-se a massa úmida. Após essa etapa, foram levadas para secarem em estufa a 105 °C por 72 horas, onde foi obtido a massa seca, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Umidade do solo de cada tratamento ao final do déficit hídrico na fase de florescimento

Tratamentos	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
	Umidade do solo (%)		
Controle	20,8	20,8	17
Déficit hídrico	11,49	8,83	6,3
Déficit hídrico + piruvato	13,68	8,18	7,18

As irrigações ocorreram diariamente, às 17 horas, aplicando-se em cada lisímetro (vaso) o volume de água correspondente à demanda da planta no período, conforme o tratamento. O volume aplicado em cada evento de irrigação foi estimado por meio de balanço hídrico, tomando como base os termos da Eq. 1,

$$C_H = V_a - V_d \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

$C_H$ : consumo hídrico (mL)

$V_a$ : volume de água aplicado às plantas no dia anterior (mL)

$V_d$ : volume drenado, quantificado na manhã do dia seguinte (mL)

O volume de água drenado do dia anterior era utilizado novamente na irrigação, com objetivo de aproveitar os nutrientes que por ventura fossem lixiviados do solo.

A adubação com NPK seguiu as recomendações para ensaios em vasos (Novais et al., 1991), aplicando-se as quantidades de 100, 300 e 150 mg dm<sup>-3</sup> de solo de N, P e K, respectivamente, nas formas de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A adubação de fundação feita apenas com fósforo e as adubações de cobertura com N e K, parceladas em três vezes (na fase vegetativa, na fase de aparecimentos dos primeiros botões florais e na abertura da primeira flor). Por vaso, foi 37,5 g de superfosfato simples, 5,55 g de ureia e 6,25 g de cloreto de potássio.

O controle de pragas e doenças apenas de modo preventivo com defensivos naturais, conforme a necessidade. O controle de ervas daninhas foi realizado periodicamente de forma manual. No período de produção, transcorreu o tutoramento das plantas para evitar o acamamento dos ramos pelo peso das maçãs.

Os parâmetros fisiológicos foram avaliados aos 35 DAE, por ocasião do final do período de suspensão hídrica, no horário entre 7 e 9 horas. A condutância estomática ( $g_s$ ) (mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), transpiração ( $E$ ) (mmol de H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), taxa assimilação de CO<sub>2</sub> ( $A$ ) (μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) (μmol mol<sup>-1</sup>), foram avaliadas por meio de um equipamento portátil de trocas gasosas por infravermelho (Infra Red Gas Analyser-IRGA, da ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro), tomando-se como base a terceira folha do ápice da planta. As avaliações de temperatura do ar e concentração de CO<sub>2</sub> em condições do ambiente, e a luminosidade ajustada em 1200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> de radiação, usando uma fonte artificial do equipamento. Com os dados de trocas gasosas foi estimada a eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ).



Nas mesmas datas relacionadas no subitem anterior, para as trocas gasosas foram avaliados os parâmetros de fluorescência da clorofila *a*, com um fluorômetro de pulso modulado, modelo OS5p da Opti Science, obtendo-se a máxima eficiência quântica do PSII ( $Fv/Fm$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $Fv/Fo$ ). As leituras foram em folhas adaptadas ao escuro por um período de 30 minutos.

Ainda aos 35 DAE foi determinado o número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH mm), a altura de planta (AP cm) e área foliar (AF cm<sup>2</sup>). Foram contabilizadas apenas as folhas acima de 2,5 cm de comprimento. O diâmetro da haste mensurado através de paquímetro digital aferido a 3 cm do colo da planta; a altura da planta medida com fita métrica graduada e a área foliar conforme a equação proposta por Grimes e Carter (1969), medindo-se o comprimento da nervura principal da folha, para obter o valor da AF de cada folha (Eq. 2), considerando as folhas completamente expandidas (2,5 cm).

$$AF_{\text{folha}} = 0,4322 X^{2,3002}$$

$$AF_{\text{planta}} = \sum AF_{\text{folha}} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:  $AF_{\text{folha}}$  é a área foliar (cm<sup>2</sup>) de cada folha do algodoeiro 'X' o comprimento da nervura principal da respectiva folha (cm), sendo a área foliar por planta ( $AF_{\text{planta}}$ ) determinada pelo somatório da área foliar ( $\sum AF_{\text{folha}}$ ) de todas as folhas.

Os componentes de produção foram quantificados pela colheita das cápsulas até 120 DAE, sendo determinado o número de capulhos por planta (Ncap), massa de capulhos por planta (Mcap - g) e a produção de algodão em caroço (Pac - g). Logo após, se chegou na produtividade da água ( $Yw$  - g L<sup>-1</sup>), pela relação entre massa de algodão em caroço e a lâmina total de água aplicada durante o ciclo da planta, em função dos tratamentos, conforme a Eq. 3, adaptada de Geerts e Raes (2009).

$$Yw = \frac{Pac}{I} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

$Yw$ - Produtividade da água (g L<sup>-1</sup>);

Pac- Produção de algodão em caroço (g);

I- Lâmina de água aplicada por planta (L).

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade das variâncias e quando com distribuição normal pela análise de variância pelo teste F. A significância dos tratamentos foi determinada pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), utilizando o software estatística Sisvar (Ferreira, 2019).

Com auxílio do Excel, as informações obtidas para as variáveis foram submetidas a estimativa do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) que representa a correlação entre duas variáveis e assume valores de -1 a 1, sendo calculado conforme eq 4.

(Eq.4)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e  $y_1, y_2, \dots, y_n$  são valores medidos de ambas as variáveis.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise de variância (Tabela 3), a condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), eficiência quântica máxima do PSII e a eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) foram influenciadas ( $p \leq 0,01$ ) pela interação tratamentos  $\times$  genótipos. Já a taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A$ ) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) pelos tratamentos e pelos genótipos de forma isolada. Para concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ) apenas entre os genótipos estudados.

**Tabela 3.** Teste F para condutancia estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instatânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ), eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) em plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAE.

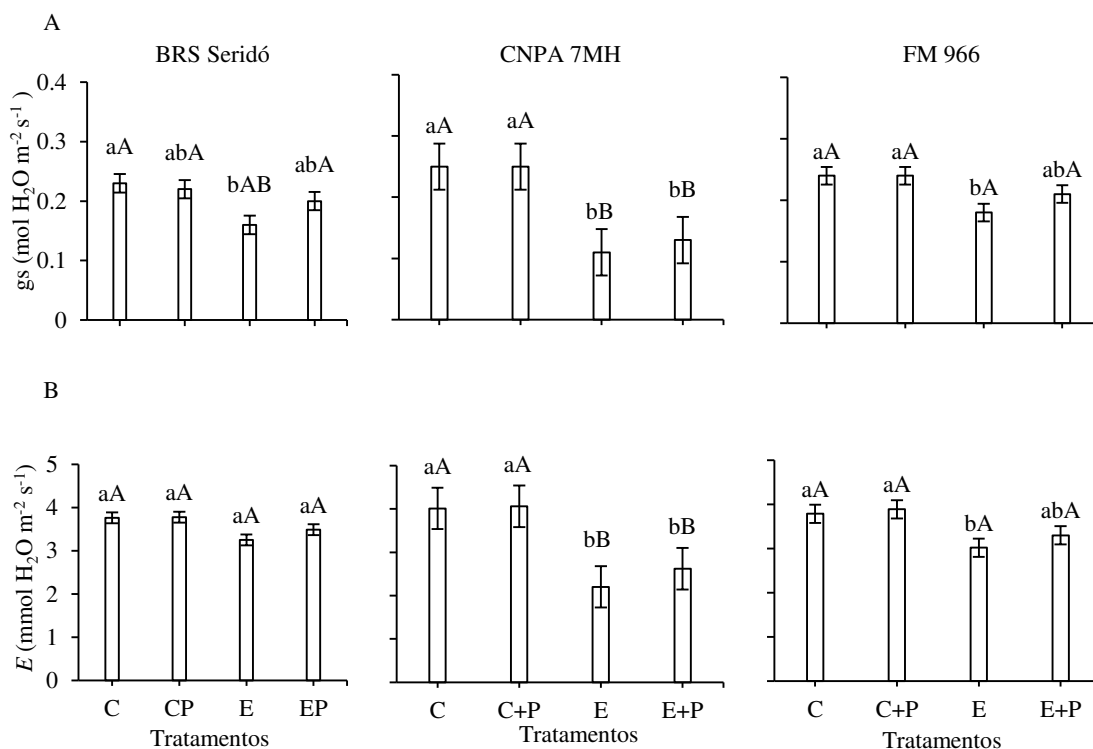
FV	Teste F							
	$g_s$	$E$	$C_i$	$A$	$A/C_i$	$A/g_s$	$F_v/F_m$	$F_v/F_o$
Tratamentos (T)	**	**	Ns	**	**	ns	**	**
Genótipos (G)	*	*	*	**	**	**	**	**
Interação T x G	*	**	Ns	ns	ns	ns	**	**
Bloco	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	13,35	9,64	8,94	10,59	15,53	15,27	1,60	5,66

\*\* , \* e ns – Significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Em comparação com as plantas controle (C), o déficit hídrico (E) reduziu a condutância estomática em todos os genótipos estudados, sendo mais acentuada em

CNPA 7MH ( $0,14 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). O fechamento estomático tem o intuito de restringir a perda de água por transpiração, no entanto, tal mecanismo limita a entrada de  $\text{CO}_2$  no mesófilo foliar, o que pode acarretar em uma maior susceptibilidade da planta a danos fotoquímicos, podendo diminuir a taxa assimilação de  $\text{CO}_2$  (Munns e Tester 2008). Essa redução acontece a custos de energia, limitando o crescimento e desenvolvimento das plantas. Todavia, com a aplicação foliar de ácido pirúvico, em BRS Seridó e FM 966, não houve diferença significativa entre o controle (C) e o déficit hídrico + aplicação de ácido pirúvico (E+P) (Figura 2A).

Similarmente a  $g_s$ , foram registradas reduções para a transpiração (Figura 2B), com maior sensibilidade ao déficit hídrico nos genótipos CNPA 7MH e FM 966, com redução de  $1,81$  e  $0,77 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente, em relação ao controle. Em BRS Seridó não houve diferença expressiva entre os tratamentos, sugerindo uma maior adaptação desse material a deficiência hídrica. A suplementação com ácido pirúvico, bloqueou bastante os efeitos deléteiros do déficit hídrico sobre a transpiração do genótipo FM 966. Essa redução, provavelmente, resultou do efeito benéfico do piruvato, que pode estar associado ao fornecimento de maior energia para a planta, sinalizando a regulação de mecanismos de defesas da planta em resposta ao estresse hídrico. Barbosa et al. (2021), estudando o efeito mitigador do piruvato ( $100$  e  $50.000 \mu\text{M}$ ) ao estresse hídrico em amendoim que também possui metabolismo C3, identificaram que, o piruvato exógeno a  $50 \text{ mM}$  aumentou em  $56\%$  a  $g_s$  e em  $46\%$  a  $E$ , em relação à média do tratamento sem piruvato, indicando efeito atenuante em plantas estressadas.

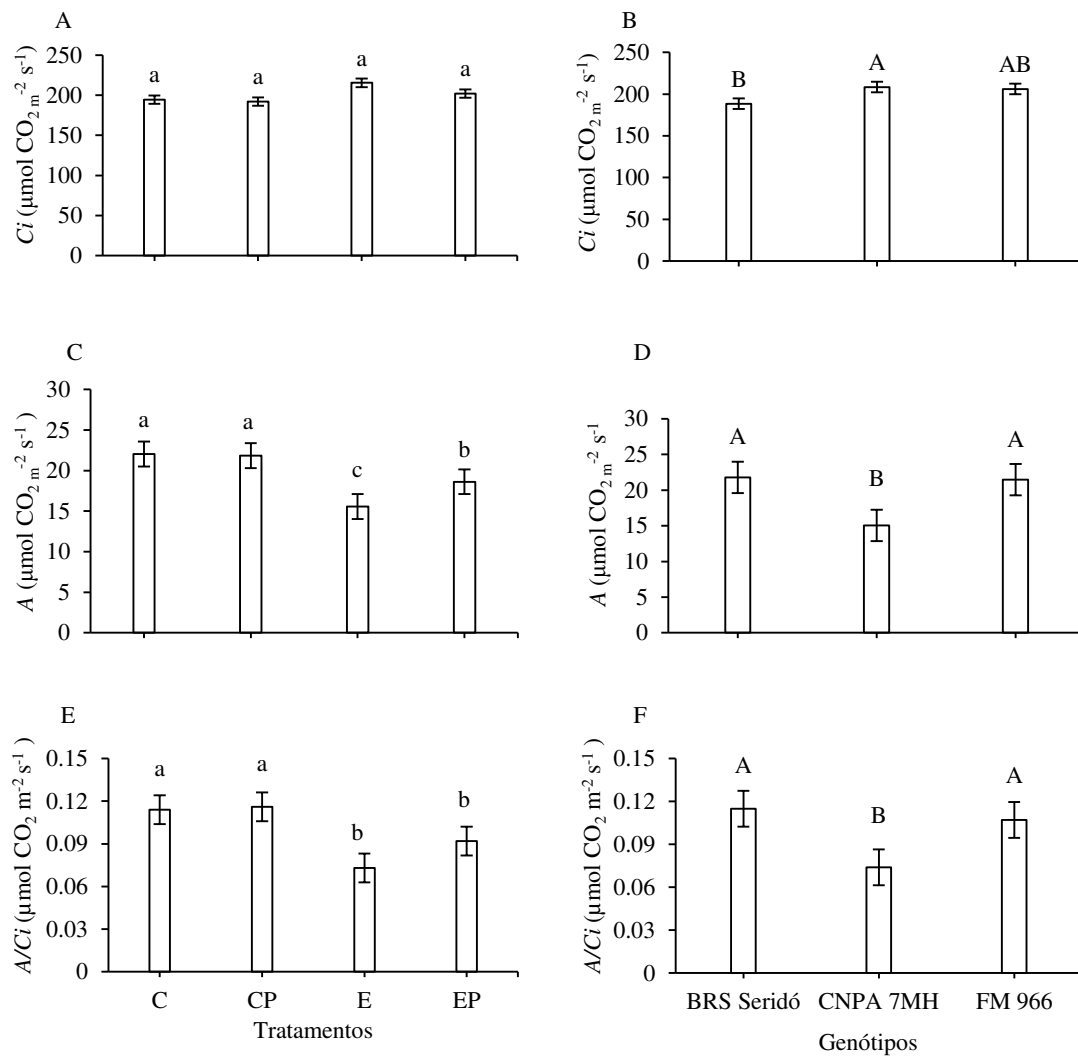


Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 2.** Desdobramento da interação para condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ) de plantas de algodão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAE.

A concentração de  $\text{CO}_2$  intercelular ( $C_i$ ) é outro parâmetro fisiológico relevante, uma vez que, está diretamente relacionado com a fotossíntese (Barbosa et al., 2020). A  $C_i$ , por exemplo, não foi influenciada pelos tratamentos (Figura 3A), enquanto que para os genótipos foi observado menor  $C_i$  no genótipo BRS Seridó (Figura 3B). Para taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  (Figura 3C), constatou-se redução de  $6,47 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , correspondendo a 29,36% entre as plantas sob restrição hídrica (E) e as plantas controle (C). Yi et al. (2016), também constataram que a taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$ , caiu 22% em plantas com déficit hídrico moderado e em 40% em plantas com déficit hídrico severo.

Todavia, no presente estudo, constatou-se aumento de  $3,06 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  com aplicação de ácido pirúvico em relação as plantas que não receberam piruvato sob déficit hídrico (Figura 3C). Comparando os genótipos estudados, observou-se maiores  $A$  em BRS Seridó e FM 966 (Figura 3D). Esses resultados da taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  estão em consonância com os de condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ), pois, a maior abertura estomática favoreceu a taxa transpiratória e, conseqüentemente, maior taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$ .



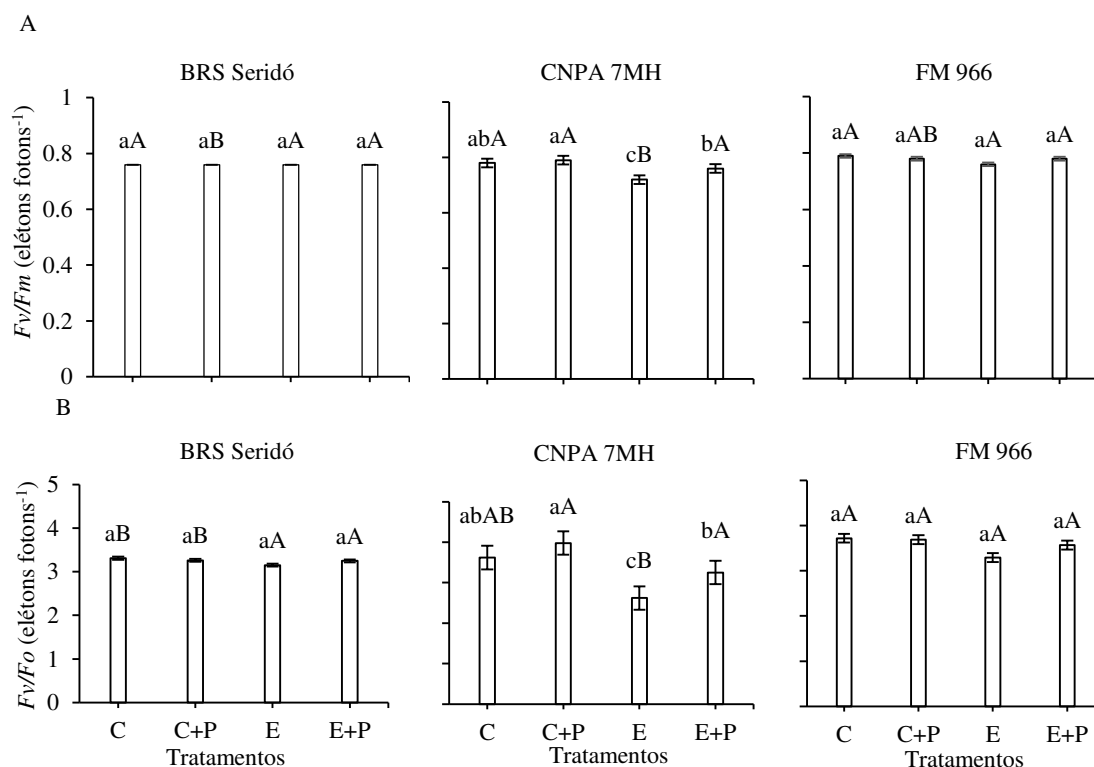
Médias seguidas da mesma letra minúscula não há diferença significativa entre os tratamentos e maiúsculas entre genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 3.** Dados médios para concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ), taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> ( $A$ ) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) de plantas de algodão em função dos tratamentos (A, B e C) e dos genótipos (D, E e F) aos 35 DAE.

A similaridade a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, foi observada para eficiência instantânea da carboxilação (Figura 3E), uma redução de  $0,041 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  com as plantas submetidas a déficit hídrico em relação ao controle. Os genótipos BRS Seridó e FM 966 obtiveram maior eficiência na taxa de carboxilação em relação ao CNPA 7MH (Figura 3F). O aumento na eficiência instantânea de carboxilação, nos genótipos BRS Seridó e FM 966, deve-se, sobretudo, aos incrementos registrados na concentração interna de dióxido de carbono e aos ganhos na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>. Segundo Silva et al. (2015), os valores elevados de concentração interna de CO<sub>2</sub> associados ao aumento na

condutância estomática indicam um acréscimo na eficiência instantânea de carboxilação em função da disponibilidade de ATP e NADPH e do substrato para a rubisco.

A restrição hídrica foi negativa para eficiência quântica máxima do PSII (Figura 4 A) e a eficiência fotoquímica do PSII (Figura 4B) apenas em CNPA 7MH, para os demais genótipos não houve diferença entre os tratamentos.



Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 4.** Desdobramento da interação para eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) de plantas de alhoão em função do genótipo e dos tratamentos aos 35 DAS.

O rendimento quântico máximo do PSII, estimado pela razão  $F_v/F_m$ , expressa a eficiência de captura da energia de excitação pelos centros de reações abertos do PSII e a dissipação fotoquímica de energia (Krause & Weiss, 1991). Segundo Bolhàr-Nordenkamp et al. (1989), em condições normais de cultivo, a razão  $F_v/F_m$  deve ser de 0,75 a 0,85. No presente estudo, apenas o genótipo CNPA 7MH obteve rendimento quântico do PSII abaixo desses valores (0,72 elétrons quantum<sup>-1</sup>), evidenciando que, a restrição hídrica no solo (E), provocou danos ao aparato fotoquímico da fotossíntese no

PSII. Isso explica os resultados das trocas gasosas, em que o genótipo CNPA 7MH demonstrou maior sensibilidade a restrição hídrica.

No entanto, quando as plantas foram submetidas ao estresse hídrico e aplicação de ácido pirúvico não houve dano no aparato fotossintético. Assim, o aumento da eficiência quântica do PSII indica melhor aproveitamento e conversão da energia luminosa (Ferraz et al., 2014). Os mesmos autores, com relação as trocas gasosas e a eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro sob aplicação de silício foliar, registraram que, as plantas ‘BRS Topázio’, ‘BRS Safira’ e ‘BRS Rubi’ ao receberem nutrição suplementar de silício não tiveram dano no PSII.

De modo geral, percebe-se que a suplementação com ácido pirúvico atenuou ou efeitos do déficit hídrico nos parâmetros fisiológico. Possivelmente, por causa da maior disponibilidade desse substrato, a ATP e NADPH foram formados e, como consequência, houve aumento na atividade fotossintética, quando as plantas receberam aplicação de ácido pirúvico.

Por ser um elemento crucial no metabolismo do Ciclo de Krebs, o piruvato tem um papel vital na conversão da glicose em energia. Com a suplementação, fato considerado na hipótese deste trabalho, moléculas de piruvato ficam à disposição das células para a produção de ATP e a energia que seria despendida na glicólise fica disponível para outros mecanismos de adaptação da planta ao estresse hídrico. Em trabalho conduzido por Barbosa et al. (2021), abordando o efeito mitigador do piruvato (100 e 50 mM) ao estresse hídrico em amendoim que também possui metabolismo C3, os autores identificaram que, a aplicação de piruvato exógeno a 50 mM contribuiu para mitigar os efeitos do estresse hídrico no cultivar IAC Caiapó (sensível à seca), com base nas trocas gasosas e na eficiência instantânea da água. Além disso, restaurou a ação de enzimas antioxidantes em BR 1 (tolerante à seca), com base em medidas de SOD (45%), CAT (129%) e APX (60%) em plantas estressadas.

A aplicação exógena de osmoprotetores tem sido considerada uma alternativa em que os produtores possam usar em suas plantações para minorar os efeitos da seca. Nesse sentido, Mekki et al. (2015) ao avaliarem o efeito da aplicação exógena de ácido ascórbico, glutatona e  $\alpha$ -tocoferol no crescimento e produtividade do algodão sob estresse hídrico, também notaram que a pulverização com GSH+ ASC aliviou os efeitos adversos do estresse hídrico.

Houve efeito significativo da interação entre os fatores sobre o número de capulhos (Ncap) massa de capulhos (Mcap) e a produção de algodão em caroço (Pac).

Para altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH) e área foliar e produtividade da água (Yw), teve efeito significativo apenas dos fatores isolados (Tabela 3).

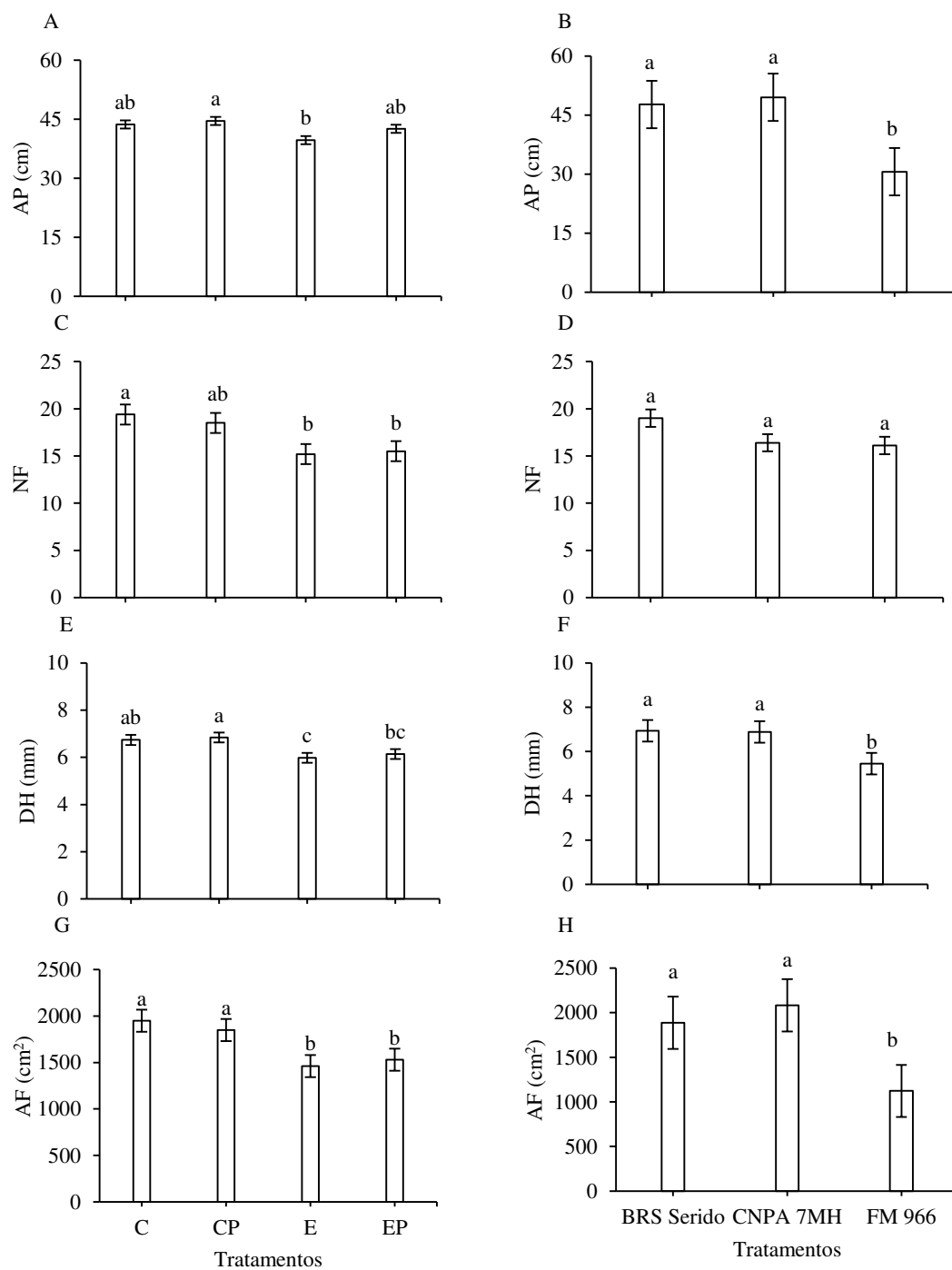
**Tabela 4.** Teste F para altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH), área foliar (AF), número de capulhos (Ncap), massa de capulhos (Mcap), produção de algodão em caroço (Pac) e produtividade da água (Yw) em genótipos de algodoeiro e dos tratamentos aos 35 DAE.

FV	Teste F							
	AP	NF	DH	AF	Ncap	Mcap	Pac	Yw
Tratamentos (T)	*	**	**	**	**	**	**	**
Genótipos (G)	**	*	**	**	ns	**	ns	**
Interação T x G	ns	ns	ns	ns	**	**	*	ns
Bloco	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	*
CV (%)	8,61	16,6	7,60	13,79	13,10	17,59	23,78	21,7

\*\* , \* e ns – Significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F.

Conforme os resultados do teste de médias para os tratamentos, na altura de plantas (Figura 5A), não houve diferença estatística entre os tratamentos controle (C), controle mais aplicação de piruvato (C+P) e restrição hídrica mais aplicação de piruvato (E+P), com AP de 43,68, 44,57 e 42,57 cm, respectivamente. Cabe mencionar que, a aplicação de ácido pirúvico foi eficiente em subsidiar energia para as plantas sob restrição hídrica, uma vez que, as plantas na ausência do ácido pirúvico reduziram 4 cm em relação as plantas controle. Estudos relacionados a deficiência hídrica com aplicação de substâncias de forma exógena também foram encontrados por Mekki et al. (2015), ao avaliarem o efeito da aplicação exógena de ácido ascórbico, glutathiona e  $\alpha$ -tocoferol no crescimento, produtividade do algodão sob estresse hídrico, mostrando que a pulverização com ASC, GSH e  $\alpha$ -TOC aumentou o crescimento de algodão plantas.





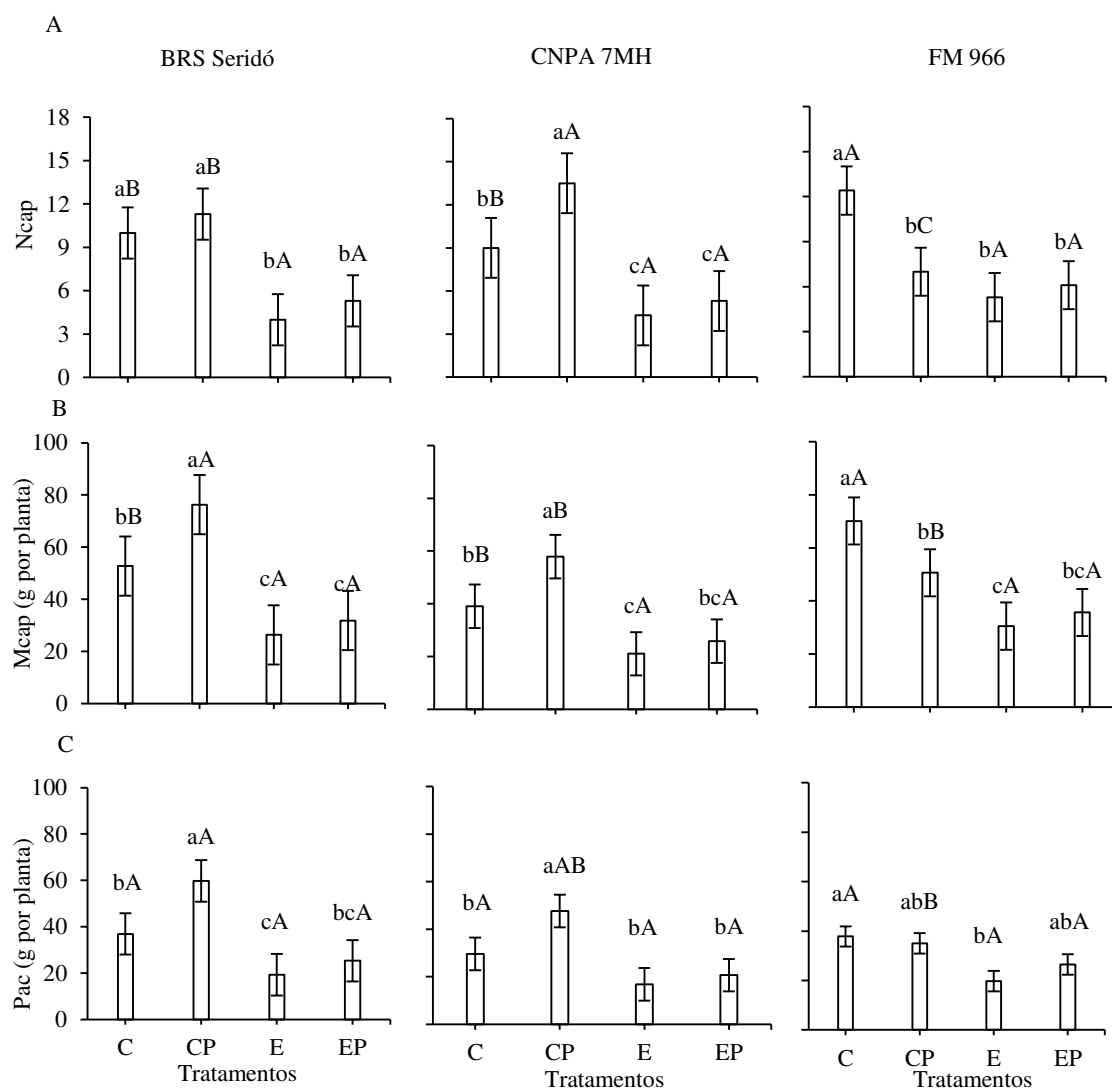
Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 5.** Altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro da haste (DH) e área foliar de plantas de algodão em função dos tratamentos (A, B, C e D) e dos genótipos (E, F, G e H) aos 35 DAE.

Todavia, ao analisar o número de folhas, diâmetro da haste e área foliar a aplicação de ácido pirúvico não minorou os efeitos do déficit hídrico (E), com reduções no NF (4,2), DH (0,76 mm) e AF (486,6 cm<sup>2</sup>), em relação ao tratamento controle (C) (Figura 5C, E e G). Isso pode está relacionado a estratégia da planta em evitar o gasto de energia e continuar os processos metabólicos sob tais condições. No entanto, ao realizar essa estratégia adaptativa, ocorre redução do fornecimento de fotoassimilados, resultando em baixo rendimento agrícola (Abdelraheem et al., 2019).

Para a altura de planta, diâmetro da haste e área foliar em função dos diferentes genótipos aos 35 DAE (Figura 5B), os genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH tiveram as maiores médias em altura de plantas, diâmetro da haste e área foliar, cujos valores médios foram 47,7 cm, 6,84 mm e 1886,4 cm<sup>2</sup> para BRS Seridó, respectivamente e 49,54 cm, 6,88 mm e 2083,4 cm<sup>2</sup> rm CNPA 7MH, respectivamente, enquanto que o genótipo FM 966 apresentou menor porte em altura (30,6 cm), diâmetro da haste (5,45 mm), e área foliar (1123,3) (Figura 5B). Tais resultados podem ser explicados pelas diferentes constituições genéticas dos materiais estudados, pois, o BRS Seridó e CNPA 7MH são materiais oriundos do cruzamento entre as subespécies Marie Galante e latifolium, eles são herbáceos e adaptados as condições semiáridas, enquanto que o FM 966 é adaptado para o cerrado.

Com a imposição da restrição hídrica no florescimento, houve redução no número de capulhos e massa de capulhos para todos os genótipos, porém, com maior intensidade em FM 966, correspondendo a 7,1 capulhos e 39,58 g na massa de capulhos, quando comparado com as plantas controle (Figura 6A e B).



Letras minúsculas iguais para tratamentos dentro de genótipos e maiúsculas iguais para genótipos dentro de tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 6.** Desdobramento da interação para número de capulhos por planta (Ncap), massa de capulho por planta (Mcap) e produção de algodão em caroço (Pac) em função do genótipo de algodoeiro e dos tratamentos aos 120 DAE.

O número de capulhos é um componente de extrema importância para determinar a produtividade do algodão em caroço. Provavelmente, o déficit hídrico promoveu baixa translocação de assimilados para os tecidos reprodutivos, levando a queda de botões florais, abortamento de flores e maçãs, acarretando em menor massa e número de capulhos por planta (Abdelraheem et al., 2019).

Tais resultados corroboram com os obtidos por Zonta et al. (2017) que também tiveram perdas no rendimento da cultura do algodoeiro, quando aplicado o déficit hídrico no florescimento. Bem como Almeida et al. (2017) com reduções no número de capulhos

e na produtividade; e Maniçoba et al. (2021) contensões no rendimento quando o déficit hídrico foi aplicado durante a abertura da primeira flor e o pico do florescimento.

Não se observou diferença significativa para Ncap e Mcap entre as plantas submetidas a déficit hídrico com e sem aplicação de piruvato para nenhum dos genótipos estudados. No entanto, é importante ressaltar que, em CNPA 7MH a Mcap das plantas estressadas que receberam piruvato, não diferiram das plantas controle (C). Pode significar que, a aplicação do ácido pirúvico na época em que as plantas estavam sob estresse, foi eficaz em aliviar os efeitos do estresse hídrico, permitindo que fotoassimilados fossem translocados para órgãos reprodutivos em crescimento, pelo aumento no tratamento E+P em relação ao tratamento E, sobre o Ncap e a Mcap para todos os genótipos avaliados.

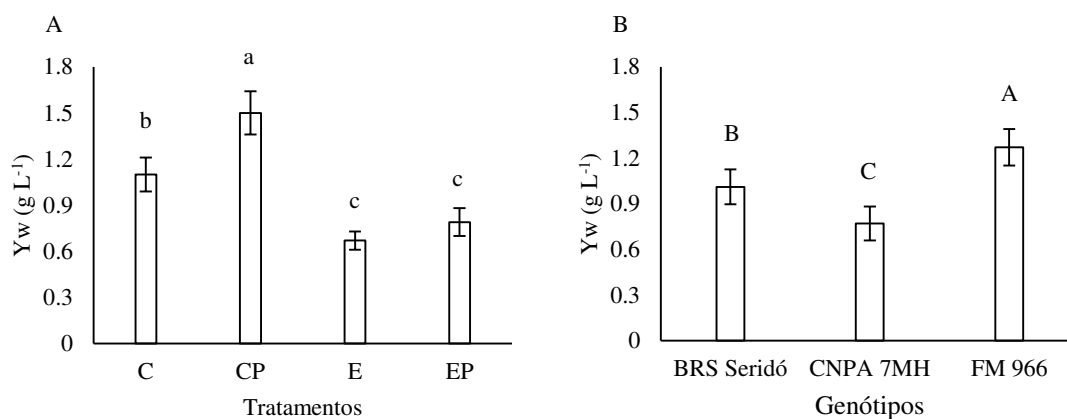
As maiores médias de Pac foram das plantas controle do genótipo BRS Seridó (59,77 g) e CNPA 7MH (47,61g) sob aplicação de ácido pirúvico (Figura 6C). Em CNPA 7MH não houve diferença significativa entre as plantas estressadas e as plantas controle. No entanto, em BRS Seridó e FM 966, constatou-se redução de 17,62 e 18,08 g por planta, respectivamente. Também não foi observada para nenhum dos genótipos diferença significativa na produção de algodão em caroço quando comparada as plantas estressadas com e sem aplicação do ácido pirúvico. Porém, as plantas tratadas com piruvato não diferiram do tratamento controle.

As reduções nos componentes de produção para BRS Seridó e CNPA 7MH atestam a flexibilidade genética delas quando submetidas a condições de seca. Ambos materiais têm uma base genética forte, em virtude da contribuição de seus progenitores que são constituídos de alelos que favorecem uma maior tolerância á restrição hídrica, fato encontrado frequentemente em regiões semiáridas (Rodrigues et al., 2016). Isso pode explicar o comportamento da CNPA 7MH, que apesar de reduzir as trocas gasosas na época da restrição hídrica, quando da reidratação, as plantas foram capazes de se recuperarem, obtendo menores perdas na produção.

Mekki et al. (2015) ao estudarem a aplicação de ASC,  $\alpha$ -TOC ou ASC+GSH+ $\alpha$ -TOC, notaram aumento no rendimento de algodão em caroço sob estresse, enquanto aplicação de ASC+GSH elevou o rendimento de fibra em relação aos demais tratamentos sob o mesma condição de estresse. Em geral, as plantas submetidas ao estresse produziram a maior produtividade de algodão em caroço (18,76 g) com o tratamento de ASC + GSH +  $\alpha$ -TOC, rendimento de fiapos (7,14g) com ASC + GSH e porcentagem de fiapos (55,42%) com GSH +  $\alpha$ -TOC. No entanto, o maior número de capulhos abertos (10,33) foi

produzido quando as plantas receberam irrigação normal (100% FC) em combinação com ASC + GSH +  $\alpha$ -TOC e/ou com plantas não tratadas.

Para produtividade da água (Figura 7A), houve aumento de 36,3% com o tratamento C+P em relação ao tratamento C. Quando as plantas foram submetidas ao déficit hídrico não houve diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação de ácido pirúvico. Em relação aos genótipos, o FM 966 obteve maior produtividade da água em relação a BRS Seridó e CNPA 7MH (Figura 7B).



Letras minúsculas iguais não há diferença significativa entre os tratamentos e maiúsculas iguais entre os genótipos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). C- controle, C+P – controle + piruvato, E – restrição hídrica e E+P – restrição hídrica + piruvato.

**Figura 7.** Produtividade da água ( $Y_w$ ) de algodoeiro em função dos tratamentos (A) e dos genótipos (B).

Na Tabela 5, observa-se a matriz de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas. As correlações que apresentam valores positivos são diretamente proporcionais e as com valores negativos são inversamente proporcionais. Correlações acima de 0,9 são consideradas muito fortes, entre 0,7 e 0,9 forte, entre 0,5 e 0,7 moderada, entre 0,3 e 0,5 fraca e entre 0 e 0,3 desprezível. No presente estudo, todas variáveis se correlacionaram entre forte e muito forte.

**Tabela 5.** Matriz de correlação de Pearson entre variáveis

	Pac	Ncap	Mcap	Yw	gs	E	Ci	A	A/Ci	A/gs	Fv/Fo	Fv/Fm	AP	NF	DH	AF
Pac	1															
Ncap	0.92	1														
Mcap	0.97	0.99	1													
Yw	1.00	0.91	0.96	1												
gs	0.91	0.99	0.97	0.89	1											
E	0.93	0.99	0.98	0.91	1	1										
Ci	-0.89	-0.91	-0.91	-0.86	-0.96	-0.95	1									
A	0.88	0.96	0.94	0.85	0.99	0.98	-0.98	1								
A/Ci	0.91	0.97	0.96	0.89	0.99	0.99	-0.99	1	1							
A/gs	-0.85	-0.97	-0.95	-0.84	-0.93	-0.94	0.79	-0.87	-0.88	1						
Fv/Fo	0.91	0.92	0.92	0.89	0.96	0.96	-1.00	0.98	0.99	-0.80	1					
Fv/Fm	0.91	0.99	0.97	0.89	1.00	1.00	-0.96	0.99	0.99	-0.93	0.96	1				
AP	0.90	0.88	0.89	0.87	0.93	0.93	-1.00	0.97	0.97	-0.74	1	0.93	1			
NF	0.82	0.98	0.94	0.81	0.96	0.96	-0.85	0.92	0.92	-0.98	0.85	0.96	0.80	1		
DH	0.95	1	1	0.94	0.99	1	-0.92	0.96	0.97	-0.96	0.93	0.99	0.90	0.96	1	
AF	0.83	0.98	0.94	0.81	0.97	0.97	-0.87	0.94	0.94	-0.97	0.88	0.97	0.83	1	0.96	1

A produtividade da água ( $Yw = 0,91$ ), massa de capulhos por plantas ( $Mcap = 0,97$ ), diâmetro da haste ( $DH = 0,95$ ), transpiração ( $E = 0,93$ ), número de capulhos por planta ( $Ncap = 0,92$ ), condutância estomática ( $gs = 0,91$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/Ci = 0,91$ ), eficiência fotoquímica do PSII ( $Fv/Fo = 0,91$ ), eficiência quântica máxima do PSII ( $Fv/Fm = 0,91$ ) altura de planta ( $AP = 0,90$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A = 0,88$ ) área foliar ( $AF = 0,83$ ) e número de folhas ( $NF = 0,82$ ) apresentaram uma correlação forte com a produção de algodão em caroço (Pac) sendo diretamente proporcionais (Tabela 5).

A concentração interna de  $CO_2$  ( $Ci = -0,89$ ), e a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/gs = -0,85$ ) também mostram uma correlação forte com a produção de algodão em caroço (Pac), porém de forma inversamente proporcional, ou seja, a medida que houve aumento nas variáveis, houve redução na produção de algodão em caroço e nas demais variáveis estudadas (Tabela 5). Isso porque o aumento na  $Ci$  representa que há uma quantidade expressiva de carbono na célula, mas, não está sendo metabolizado. É interessante observar que a  $Ci$ ,  $A/gs$ , são diretamente proporcionais, a medida que uma aumenta a outra também aumenta e assim vice-versa.

## CONCLUSÕES

O déficit hídrico no florescimento da cultura, reduz com maior intensidade o número de capulhos, massa de capulhos, produção de algodão em caroço e a produtividade da água do algodoeiro FM 966 em relação a BRS Seridó e CNPA 7MH.

A aplicação foliar de ácido pirúvico minora os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre eficiência quântica máxima do PSII ( $F_v/F_m$ ) e eficiência fotoquímica do PSII ( $F_v/F_o$ ) em plantas do algodoeiro CNPA 7MH.

A aplicação de ácido pirúvico em plantas de algodoeiro sob irrigação plena, aumenta a produtividade da água.

## AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFCG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e a Embrapa Algodão pelo espaço disponibilizado para realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS CITADAS

- Abdelraheem, A.; Esmaili, N.; O'Connell, M.; Zhang, J. Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton. *Industrial Crops and Products*, v.130, p.118-129, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.070>
- Almeida, E. S. A. B.; Pereira, J. R.; Azevedo, C. A. V.; Araújo, W. P.; Zonta, J. H.; Cordão, M. A. Algodoeiro herbáceo submetido a déficit hídrico: Produção. *ACSA*, v.13, p.22-28, 2017.
- Barbosa, D. D.; Fernandes, P. D.; Marcelino, A. D. A. de L.; Silva, F. de A.; Dias, M. dos S.; Silva, C. R. C.; Santos, R. C. Exogenous pyruvate mitigates the detrimental effects of water stress in contrasting peanut genotypes. *Genetics and Molecular Research*. v.20, p.1-14, 2021. <https://doi.org/10.4238/gmr18907>
- Farahani, H. J.; Oweis, T. Y.; Izzi, G. Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. *Irrigation science*, v.26, p.375-383, 2008. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/7814>
- Ferraz, R. L. D. S.; Costa, P. D. S.; Magalhães, I. D.; Medeiros, A. D. S.; Viégas, P. R. A.; Melo, A. S. D. Physiological adjustments, fiber yield and quality of colored cotton BRS Topázio cultivar under leaf silicon spraying. *Ciência e Agrotecnologia*, v.45, p.1-10, 2021. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145005721>

- Ferreira, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v.37, p.529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Grimes, D. W.; Carter, L. M. A linear rule for direct nondestructive leaf area measurements. *Agronomy Journal*, v.3, p.477-479, 1969. <https://doi.org/10.2134/agronj1969.00021962006100030048x>
- Kerbauy, G. B. *Fisiologia vegetal*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p.
- Maniçoba, R. M.; Sobrinho, J. E.; Zonta, J. H.; Junior, E. G. C.; Oliveira, A. K. S.; Silva Freitas, I. A. Resposta do algodoeiro à supressão hídrica em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. *Irriga*, v.26, p.123-133, 2021. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n1p123-133>
- Mekki, B. E. D., Hussien, H. A., & Salem, H. Role of glutathione, ascorbic acid and  $\alpha$ -tocopherol in alleviation of drought stress in cotton plants. *International Journal of ChemTech Research*, v.8, p.1573-1581, 201
- Niu, J.; Zhang, S.; Liu, S.; Ma, H.; Chen, J.; Shen, Q.; Zhao, X. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress. *Journal of plant physiology*, v.224, p.30-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.001>
- Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J. *Métodos de pesquisa em fertilidade do solo*. Brasília: Embrapa-SEA. 1991, p.189-253.
- Shen, J. L.; Li, C. L.; Wang, M.; He, L. L.; Lin, M. Y.; Chen, D. H.; Zhang, W. Mitochondrial pyruvate carrier 1 mediates abscisic acid-regulated stomatal closure and the drought response by affecting cellular pyruvate content in *Arabidopsis thaliana*. *BMC plant biology*, v.17, p.217, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1175-3>
- Shiraku, M. L.; Magwanga, R. O.; Zhang, Y.; Hou, Y.; Kirungu, J. N.; Mehari, T. G.; Xu, Y.; Wang, Y.; Wang, K.; Cai, X.; Zhou, Z.; Liu, F. Late embryogenesis abundant gene LEA3 (Gh-A08G0694) enhances drought and salt stress tolerance in cotton. *International Journal of Biological Macromolecules*, v.207, p.700-714, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.110>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, D.; Teixeira, W. G. *Manual de métodos de análise de solo*. 3.ed. Brasília: Embrapa. 2017. 573p.
- Ul-Allah, S.; Rehman, A.; Hussain, M.; Farooq, M. Fiber yield and quality in cotton under drought: Effects and management. *Agricultural Water Management*, v.255, p.106994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106994>
- Yi, X. P.; Zhang, Y. L.; Yao, H. S.; Luo, H. H.; Gou, L.; Chow, W. S.; Zhang, W. F. Rapid recovery of photosynthetic rate following soil water deficit and re-watering in



cotton plants (*Gossypium herbaceum* L.) is related to the stability of the photosystems. Journal of Plant Physiology, v.194, p.23-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.016>

Zonta, J. H.; Brandão, Z. N.; Rodrigues, J. I. da S.; Sofiatti, V. Cotton response to water deficits at different growth stages. Revista Caatinga, v.30, p.980-990, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n419rc>

Zwart, S. J.; Bastiaanssen, W. G. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agricultural water management, v.69, p.115-133, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>

**CAPÍTULO IV: APLICAÇÃO FOLIAR DE  $C_3H_4O_3$  EM GENÓTIPOS DE  
ALGODOEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO VARIANDO A FASE FENOLÓGICA**

---

## APLICAÇÃO FOLIAR DE C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub> EM GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO SOB DÉFICIT HÍDRICO VARIANDO A FASE FENOLÓGICA

**Resumo:** O algodoeiro é uma das maiores commodities agrícolas, gerando várias fontes de divisas e emprego em nível mundial. No semiárido, o déficit hídrico é o fator ambiental que mais limita a sua produção, sendo necessário o uso de tecnologias que atenuem seus efeitos deletérios sobre as lavouras. Diante disso, objetivou-se avaliar as trocas gasosas, o crescimento e a produção de genótipos de algodoeiro sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica. O experimento foi conduzido em condições de ambiente protegido da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Algodão, em Campina Grande, PB. Os tratamentos resultaram da combinação entre três genótipos de algodão (BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966), cinco tratamentos (C- controle, VE - déficit hídrico na fase vegetativa, VE+P - déficit hídrico na fase vegetativa + aplicação de ácido pirúvico, FL - déficit hídrico no florescimento e FL+P - déficit hídrico no florescimento e aplicação de ácido pirúvico, distribuídos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial (3 × 5) com três repetições, perfazendo 45 unidades experimentais, sendo a parcela composta por 2 plantas. As trocas gasosas, e o crescimento do algodoeiro BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966 reduzem com maior intensidade quando o déficit hídrico é aplicado no florescimento. O número de capulhos, massa de capulhos e a produção de algodão em caroço do algodoeiro FM 966, diminuí significativamente com o déficit hídrico na fase de florescimento. A aplicação de 100 µM de ácido pirúvico minorou os efeitos da restrição hídrica sob a produção de algodão em caroço em BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966. E o déficit hídrico na fase vegetativa é menos prejudicial a cultura do algodoeiro do que no florescimento.

**Palavras-chave:** *Gossypium hirsutum* L., produtividade da água, restrição hídrica, piruvato.

## FOLIAR APPLICATION OF C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub> ON THE MOFORPHYSIOLOGY AND PRODUCTION OF COTTON UNDER WATER DEFICIT VARYING THE PHENOLOGICAL PHASE

**Abstract:** Cotton is one of the largest agricultural commodities, generating several sources of foreign exchange and employment worldwide. In the semi-arid region, water deficit is the environmental factor that most limits its production, requiring the use of technologies that mitigate its deleterious effects on crops. Therefore, the objective was to evaluate gas exchange, growth and production of cotton genotypes under water deficit and application of pyruvic acid varying the phenological phase. The experiment was carried out in conditions of a protected environment of the Brazilian Agricultural Research Corporation – Embrapa Algodão, in Campina Grande, PB. The treatments resulted from the combination of three cotton genotypes (BRS Seridó, CNPA 7MH and FM 966), five treatments (C- control, VE - water deficit in the vegetative phase, VE+P - water deficit in the vegetative phase + application of pyruvic acid, FL - water deficit at flowering and FL+P - water deficit at flowering and application of pyruvic acid, distributed in a randomized block design in a factorial scheme (3 × 5) with three replications, totaling 45 experimental units, with the plot consisting of 2 plants. Gaseous exchanges and growth of cotton BRS Seridó, CNPA 7MH and FM 966 are reduced with greater intensity when water deficit is applied at flowering. The number of bolls, boll mass and cottonseed production of cotton FM 966, significantly decreases with water deficit in the flowering phase. The application of 100 µM of pyruvic acid lessens the effects of water restriction on seed cotton production in BRS Serido, CNPA 7MH and FM 966. And the water deficit in the vegetative phase is less harmful to the cotton crop than in flowering.

**Key words:** *Gossypium hirsutum* L., water productivity, water restriction, pyruvate.

### INTRODUÇÃO

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das plantas mais cultivadas no mundo, devido à grande utilização e aplicabilidade da fibra na indústria têxtil. Além de ser a mais importante fonte de fibra natural, é um produto de inquestionável importância socioeconômica, gerando renda e empregos, em toda a cadeia do agronegócio (Zonta et al., 2016; Niu et al., 2018; Alves et al., 2019).

De acordo com a CONAB (2021), a produção de algodão no Brasil, safra 2020/2021, foi de 2,6 milhões de toneladas. Esses valores são indicativos de uma queda de 22%, em comparação com a safra anterior, decorrente da redução da área plantada, que é fruto da retração do mercado, durante a pandemia de Covid-19 e das oscilações climáticas. Nesse contexto, o Brasil se destaca como um dos principais produtores, exportadores de fibra e um dos maiores consumidores de algodão em pluma (Abrapa, 2021).

Para a obtenção de altas produtividades, não é suficiente saber a quantidade de água, mas, que a distribuição atenda as necessidades hídrica das plantas, em cada fase fenológica. Entretanto, as mudanças climáticas aumentaram a frequência e a intensidade dos períodos de estresse abiótico, especialmente a seca, que tem se tornado o fator ambiental que mais limita a produtividade da cotonicultura em regiões áridas e semiáridas (Niu et al., 2018; Ul-Allah et al., 2021). Tais ocorrências refletem em déficit da disponibilidade hídrica para as plantas.

O estresse hídrico interfere nas trocas gasosas, síntese e funções de enzimas, síntese de solutos compatíveis, desidratação e perda de turgor, com consequências negativas na divisão e expansão das células e no crescimento/desenvolvimento das plantas (Echer, et al., 2014; Ul-Allah et al., 2021). Segundo Vison et al. (2018), após a percepção da redução na disponibilidade hídrica, as plantas tolerantes ativam mecanismos de adaptação e de proteção das células. Os vegetais investem no potencial hídrico celular, por meio da síntese e acumulação de osmoprotetores e solutos compatíveis, além da ativação de mecanismos para melhorar o metabolismo e funcionamento celular (Lisar et al., 2012).

Embora sejam encontradas referências aos efeitos da falta de água no algodão, com registros de serem afetados parâmetros morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e moleculares (Niu et al., 2018; Snowden et al., 2013; Zonta et al., 2017; Lima et al., 2018), há carência de estudos sobre uso de substâncias orgânicas para atenuar os efeitos do estresse hídrico nos vários processos metabólicos das plantas.

Com piruvato, foi encontrado na literatura trabalho com *Arabidopsis thaliana*, em que folhas foram incubadas, por um período de 2,5 h, em ácido pirúvico nas concentrações de 10, 100 e 1000  $\mu\text{M}$  e que na concentração de 100  $\mu\text{M}$ , o piruvato aumentou a corrente aniônica nas células guarda, induzindo o fechamento estomático (Shen et al., 2017).

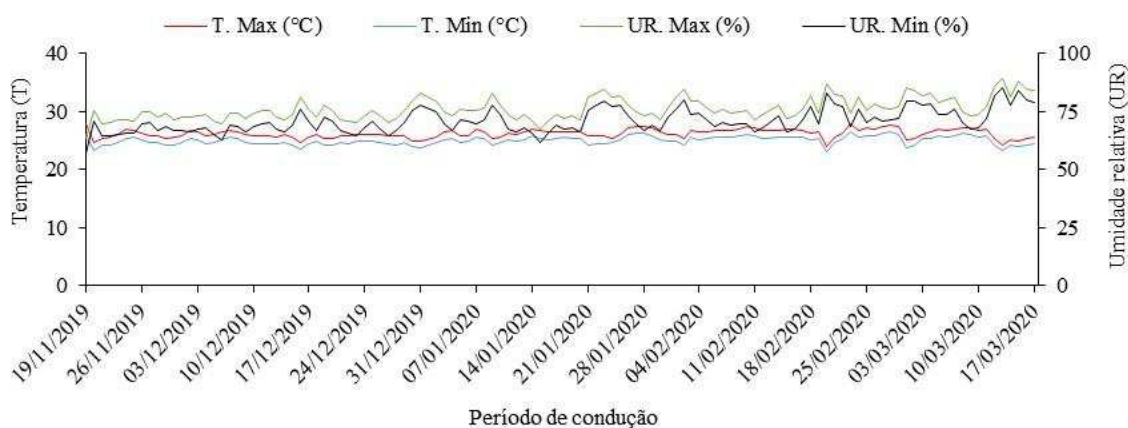
Dessa forma, os resultados são promissores, com perspectivas de avanço da agricultura, especialmente, em áreas de regiões semiáridas, onde a produção, em geral, é prejudicada por estiagens e secas.

Assim, objetivou-se avaliar as trocas gasosas, o crescimento e a produção de genótipos de algodoeiro sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica.

## MATERIAL E METÓDOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Algodão, localizada no município de Campina Grande, estado da Paraíba, Brasil (06° 48' 50" S e 37° 56' 31" W e altitude de 550 m).

Os dados climáticos durante execução do experimento encontram-se na Figura 1.



**Figura 1.** Temperatura máxima (T. Max), mínima (T. Min), umidade relativa do ar máxima (UR. Max) e mínima (UR. Min) durante a execução da pesquisa.

Três genótipos de algodoeiros (BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966) foram submetidos a cinco tratamentos (C - controle, irrigação plena durante todo ciclo da cultura; VE – déficit na fase vegetativa, VE + P - déficit hídrico + aplicação de 100  $\mu$ M de ácido pirúvico; FL - déficit hídrico no florescimento e FL + P - déficit hídrico e aplicação de 100  $\mu$ M de ácido pirúvico no florescimento).

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental de blocos casualizados em esquema fatorial 3  $\times$  5, com três repetições, perfazendo 45 unidades experimentais. Cada unidade composta por duas plantas, totalizando 90 plantas.

A suspensão da irrigação na fase vegetativa iniciou quando as plantas estavam no estágio V2, aos 15 dias após a emergência (DAE) e no florescimento quando 80% do

stande já havia emitido o primeiro botão floral. Em ambas as fases a aplicação foliar com ácido pirúvico foi no quarto, quinto e sexto dia após o início da suspensão da irrigação. As plantas que não foram suplementadas com piruvato, receberam aplicação de água destilada na mesma proporção da solução de piruvato, visando comparar os resultados dos dois tratamentos.

As plantas foram conduzidas em vasos plásticos (33 cm × 25 cm), dispostos em linhas espaçadas de 1,0 m entre si e 0,5 m dentro de cada linha, forrados com uma tela na parte inferior para evitar a perda de solo e uma camada de 3,0 cm de brita para evitar a obstrução do dreno pelo material de solo, uma mangueira foi colocada na parte inferior do vaso e acoplada a um recipiente plástico com capacidade de 2,0 L para coleta da água drenada.

Os lisímetros foram preenchidos com 25,0 dm<sup>3</sup> de material de solo (Neossolo Regolítico) coletado no município de Campina Grande, área do Agreste paraibano, cujos atributos químicos e físicos, determinados em laboratório, conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017), Tabela 1.

**Tabela 1.** Atributos químicos do solo, determinados no Laboratório de Irrigação e Salinidade (LIS/UAEA/UFCG), Campina Grande, PB

pH	P	K	Ca	Na	Mg	Al	H	SB	CTC	v	m	MO
5,79	mg dm <sup>-3</sup>	.....cmolc dm <sup>-3</sup> .....					.....%		.....%		g dm <sup>-3</sup>	
	0,1	0,13	0,88	0,06	1,0	0,52	1,28	2,07	3,87	53,48	20,07	6,2
Granulometria				D. do solo (g cm <sup>-3</sup> )		Porosidade (%)		P. matriciais (atm)		Umidade (%)		Água disponível (%)
Areia		Silte		Argila								
.....(%).....		.....(%).....		.....(%).....								
92,07		6,03		1,90		1,63		40,29				5,37
Classificação								15,00		3,82		
Areia franca												

CTC a pH 7,0; Extração: Água (pH); Mehlich (P, K, Na); KCl 1N (Ca, Mg e Al); Acetato de Cálcio pH 7,0 (H + Al).

Antes da semeadura, a umidade do solo foi elevada ao nível correspondente próximo ao da capacidade de campo, através do método de saturação por capilaridade seguida por drenagem. Na semeadura, distribuiu-se quatro sementes por lisímetro na profundidade de 1,5 cm e aos 10 após a emergência (DAE), e feito o desbaste, deixando duas plantas por vaso, as mais vigorosas.

Para aplicação foliar, a solução de piruvato (100 µM) tem como base a diluição de 6,9 µL de ácido pirúvico em 1,0 L de água destilada. As pulverizações das plantas foram sempre ao final da tarde com auxílio de um borrifador. Durante as aplicações, as plantas foram protegidas com um plástico (para se evitar deriva para outras plantas) e o solo

coberto com uma manta (evitar escoamento da solução para o solo e que a planta viesse a absorvê-la pela raiz).

Ao final do período de suspensão da irrigação, foram coletadas amostras de solo com auxílio de um mini-trado para determinar o teor de umidade do solo nos referidos tratamentos, conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Umidade do solo em cada tratamento ao final do período de restrição hídrica na fase vegetativa e florescimento aos 22 e 35 DAE, respectivamente.

Tratamentos	Fase vegetativa			Fase de florescimento		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
	Umidade do solo (%)			Umidade do solo (%)		
Controle	22,97	21,50	18,16	20,8	20,8	17,0
C. piruvato	16,02	16,24	15,77	13,68	8,18	7,18
S. piruvato	15,63	15,45	14,94	11,49	8,83	6,3

As irrigações foram realizadas diariamente, às 17 horas, aplicando-se em cada lisímetro (vaso) o volume de água correspondente à demanda da planta no período, conforme o tratamento. O volume aplicado em cada evento de irrigação foi estimado por meio de balanço hídrico, tomando como base os termos da Eq. 1.

$$C_H = V_a - V_d \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

$C_H$ : é o consumo hídrico (mL);

$V_a$ : Volume de água aplicado às plantas no dia anterior (mL); e

$V_d$ : Volume drenado, quantificado na manhã do dia seguinte (mL).

O volume de água drenado do dia anterior era empregado novamente na irrigação, com objetivo de aproveitar os nutrientes que por ventura fossem lixiviados do solo.

A adubação com NPK seguiu as recomendações para ensaios em vasos (Novais et al., 1991), aplicando as quantidades de 100, 300 e 150 mg dm<sup>-3</sup> de solo de N, P e K, respectivamente, nas formas de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A adubação de fundação apenas com fósforo e as adubações de cobertura com N e K, parceladas em três vezes (na fase vegetativa, na fase de aparecimentos dos primeiros botões florais e na abertura da primeira flor). Foi utilizado 37,5 g de supersimples, 5,55 g de ureia e 6,25 g de cloreto de potássio por vaso.



Já o controle de pragas e doenças ocorreu de modo preventivo com defensivos naturais, conforme a necessidade. O controle de ervas daninhas de forma periódica e manual. No período de produção, realizou-se o tutoramento das plantas com objetivo de evitar o acamamento dos ramos pelo peso dos frutos (maçãs).

Os parâmetros fisiológicos foram avaliados aos 22 e 35 DAE, por ocasião do final do período de suspensão hídrica na fase vegetativa e na fase de florescimento da cultura. A condutância estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração ( $E$ ) ( $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ), avaliadas por meio de um equipamento portátil de trocas gasosas por infravermelho (Infra Red Gas Analyser-IRGA, da ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro), tomando como base a terceira folha do ápice da planta. As avaliações de temperatura do ar e concentração de  $\text{CO}_2$  transcorreram sob condições do ambiente, e a luminosidade ajustada em  $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiação, usando uma fonte artificial que vem com o equipamento. Com os dados de trocas gasosas foi estimada a eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ).

Aos 120 DAE foram determinados a altura de planta (AP cm), com fita métrica graduada, rente ao solo até o ápice da planta e o diâmetro da haste (DH mm), através de paquímetro digital aferido no colo da planta a 3 cm do solo.

Os componentes de produção foram quantificados pela colheita dos capulhos até 120 DAE, sendo quantificado o número de capulhos por planta (Ncap), massa de capulhos por planta (Mcap - g) e a produção de algodão em caroço (Pac - g).

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade das variâncias e quando com distribuição normal feita análise de variância pelo teste F. A significância dos tratamentos pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), por meio do software estatístico Sisvar (Ferreira 2019).

Em seguida, os dados foram normalizados para média zero ( $= 0,0$ ) e variância unitária ( $\sigma^2 = 1,0$ ) e avaliados por meio da análise multivariada através da análise de componentes principais (CPA), condensando a quantidade de informações relevantes contidas nos dados originais definido em um número menor de dimensões, resultante de combinações lineares das variáveis originais, geradas a partir dos maiores autovalores ( $\lambda > 1,0$ ) na matriz de correlação, explicando uma porcentagem maior que 10% de  $\sigma^2$  (Govaerts et al., 2007). Apenas as variáveis com coeficiente de correlação de Pearson acima de 0,6 foram mantidas na composição de cada componente principal (CP) (Hair Jr. et al. 2009). Assim, foram retiradas do banco de dados, a concentração interna de  $\text{CO}_2$

e o diâmetro da haste. As análises foram processadas pelo software Statistica v. 7.0 (Statsoft, 2004).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do Teste F para os parâmetros fisiológicos, biométricos e componentes de produção estão na Tabela 3. Há diferença estatística significativa para todos os tratamentos e para interação entre os genótipos e tratamentos, indicando que os parâmetros fisiológicos, biométricos e produção dos genótipos de algodoeiro, sofrem alteração em decorrência da imposição ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas do algodoeiro sob pulverização foliar com ácido pirúvico.

**Tabela 3.** Teste F para condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ), taxa de assimilação de  $CO_2$  ( $A$ ), eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ), altura de planta ( $AP$ ), diâmetro da haste ( $DH$ ), número de capulhos ( $N_{cap}$ ), massa de capulhos ( $M_{cap}$ ) e produção de algodão em caroço ( $P_{ac}$ ) de três genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica.

FV	Teste F									
	$g_s$	$E$	$C_i$	$A$	$A/C_i$	$AP$	$DH$	$N_{cap}$	$M_{cap}$	Prod
Tratamentos (T)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Genótipos (G)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Interação T x G	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Bloco	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\*\* , \* e ns – Significativo ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) e não significativos, respectivamente, pelo teste F

Para condutância estomática ( $g_s$ ), não houve diferença significativa entre os genótipos de algodoeiro quando submetidos a restrição hídrica na fase vegetativa (VE), ou seja, sem perdas substanciais que os diferenciassem. No entanto, o déficit hídrico na fase de florescimento (FL) o genótipo CNPA 7MH reduziu a  $g_s$  com maior intensidade (56%), diferindo estatisticamente do BRS Seridó (30,4%) e FM 966 (25%), em relação ao tratamento controle. Ao realizar a aplicação foliar com ácido pirúvico também se observou que na fase vegetativa (VE+P) os genótipos de algodoeiros obtiveram reduções semelhante na  $g_s$ , não diferindo entre si. Porém, na fase de florescimento (FL+P) as menores reduções são dos algodoeiros BRS Seridó (13,4%) e FM 966 (12,5%) em relação ao CNPA 7MH (48%) (Tabela 4).

**Tabela 4.** Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ) de genótipos de algodoeiros sob restrição hídrica e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica

Tratamentos	Dados médios					
	$g_s$ (mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )			$E$ (mmol de H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
Controle VE	0,24	0,23	0,21	3,56	3,59	4,76
VE	0,22	0,21	0,19	3,08	2,98	4,56
VE+P	0,23	0,22	0,19	3,02	3,22	4,43
Controle FL	0,23	0,25	0,24	3,76	4,01	3,79
FL	0,16	0,11	0,18	3,25	2,2	3,02
FL+P	0,20	0,13	0,21	3,49	2,62	3,30
Diferença média em relação ao controle						
VE	-0,02bA	-0,02bA	-0,02bA	-0,48abA	-0,61cA	-0,20cB
FL	-0,07aB	-0,14aA	-0,06aB	-0,51abC	-1,81aA	-0,77aB
VE+P	-0,01bA	-0,01bA	-0,02bA	-0,54aA	-0,37cA	-0,33bcA
FL+P	-0,03bB	-0,12aA	-0,03bB	-0,27bB	-1,39bA	-0,49bB
DMS1		0,03			0,24	
DMS2		0,02			0,22	

Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada genótipos e maiúsculas genótipos dentro de cada tratamento pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). VE - Restrição hídrica na fase vegetativa; FL - restrição hídrica no florescimento; P - aplicação de ácido pirúvico. DMS1 e DMS2 - diferença média significativa dos tratamentos em cada genótipo e DMS2 - diferença média significativa dos genótipos em cada tratamento.

Ainda na Tabela 4, observa-se que a condutância estomática foi influenciada pelos tratamentos em cada genótipo estudado. Em BRS Seridó e FM 966, as menores reduções na  $g_s$  das plantas dos tratamentos VE (8,3 e 9,5%), VE+P (4,1 e 9,5%) e FL+P (13,4 e 12,5%) diferindo das plantas submetidas ao tratamento FL. Para CNPA 7MH as menores reduções ocorreram com os tratamentos VE (8,6%) e VE+P (4,2%), que diferiram bastante de FL (56%) e FL+P (48%).

Tais resultados demonstram que, o déficit hídrico imposto no início do florescimento do algodoeiro compromete com maior intensidade a abertura dos estômatos em todos os genótipos. E a aplicação de ácido pirúvico foi capaz de amenizar os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre o fechamento dos estômatos dos genótipos BRS Seridó e FM 966 na fase de florescimento (Tabela 4).

A abertura estomática é regulada pela variação de água no solo, mantendo um equilíbrio ótimo entre a transpiração e a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (Martins et al. 2016). No entanto, quando a planta reduz de forma drástica a abertura estomática, o fluxo de CO<sub>2</sub> nos cloroplastos é comprometido, diminuindo a disponibilidade de substrato para reação de carboxilação da Rubisco (Zhou et al. 2014).

Apesar de não se ter diferença significativa entre os genótipos sobre a  $g_s$  quando as plantas passaram por restrição hídrica na fase vegetativa (VE), na transpiração ( $E$ ), o BRS Seridó e CNPA 7MH reduziram com maior intensidade a taxa transpiratória 13,4 e

16,9%, diferindo do FM 966 com 4,2%. No entanto, quando aplicado o ácido pirúvico em plantas sob tais condições, os genótipos BRS Seridó e CNPA 7MH tiveram reduções semelhantes ao FM 966, não diferindo entre si. O déficit hídrico na fase de florescimento (FL) o CNPA 7MH reduziu 45,13% a transpiração diferindo de BRS Seridó (13,5%) e FM 966 (20,31%). Quando as plantas foram tratadas com ácido pirúvico no florescimento (FL+P), houve aumento na transpiração, no BRS Seridó 7,48%, em CNPA 7MH 19,09% e para FM 966 9,07%, quando comparados com as plantas que não receberam piruvato (Tabela 4).

A transpiração das plantas está intrinsicamente relacionada a abertura estomática, ou seja, houve tendência similar a  $g_s$  entre os tratamentos para os genótipos CNPA 7MH e FM 966, em que o tratamento FL proporcionou maior redução na taxa transpiratória. Para BRS Seridó, houve diferença significativa apenas entre os tratamentos VE+P e FL+P (Tabela 4). Barbosa et al. (2021), ao avaliarem a aplicação foliar de ácido pirúvico (50 mM) em plantas de amendoim sob déficit hídrico na fase vegetativa, observaram aumento de 56% na condutância estomática e 46% na transpiração, quando relacionadas as plantas sem a aplicação do ácido pirúvico.

Houve aumento da concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) com o tratamento VE em BRS Seridó, no qual diferiu dos demais genótipos. Para o tratamento FL maior taxa de carbono interno foi do algodoeiro FM 966, enquanto que para VE+P as maiores taxas em CNPA 7MH e FL+P em CNPA 7MH e FM 966, diferindo estatisticamente do BRS Seridó (Tabela 5).

Analisando a  $C_i$  dentro de cada genótipo, observou-se diferença significativa entre os tratamentos. Para BRS Seridó, a maior concentração de carbono estocado na célula foi das plantas submetidas ao déficit hídrico na fase vegetativa (VE), porém não prejudicou a taxa de assimilação de  $CO_2$ . Enquanto que, para CNPA 7MH as maiores concentrações de carbono com os tratamentos VE, VE+P e FL, os quais foram diferentes estatisticamente de FL+P. Em FM 966, o tratamento FL subsidiou maior taxa de carbono, mas não sendo metabolizado, o que levou a maiores reduções na taxa de assimilação de  $CO_2$  e na eficiência instatânea da carboxilação (Tabela 5).

**Tabela 5.** Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*) e taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*) de genótipos de algodoeiros sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica.

Tratamentos	Dados médios					
	<i>C<sub>i</sub></i> ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )			<i>A</i> ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
Controle 1	194,5	200,3	176,3	20,76	19,74	19,60
VE	230,0	216,0	186,3	20,0	17,43	18,04
VE+P	204,3	217,3	176,6	20,6	18,48	18,45
Controle 2	191,3	201,0	191,6	22,49	18,80	24,81
FL	195,3	217,0	234,0	20,26	10,86	15,56
FL+P	192,0	211,3	203,0	21,39	13,53	20,95
	Diferença média em relação ao controle					
VE	+35,5 aA	+15,70 aB	+10,0 bC	-0,76 abB	-2,31 cA	-1,56 cAB
FL	+4,0 cC	+16,0 aB	+42,40 aA	-2,23 aB	-7,94 aA	-9,25 aA
VE+P	+9,8 bB	+17,0 aA	+0,3 cC	-0,16 bA	-1,26 cA	-1,15 cA
FL+P	+0,70 dB	+10,3 bA	+11,4 0bA	1,10 abC	-5,27 bA	-3,86 bB
DMS1		2,36			1,55	
DMS2		2,13			1,40	
Tratamentos	Dados médios					
	<i>A/C<sub>i</sub></i>					
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966			
Controle 1	0,106	0,098	0,111			
VE	0,086	0,080	0,096			
VE+P	0,100	0,085	0,108			
Controle 2	0,110	0,090	0,130			
FL	0,100	0,05	0,070			
FL+P	0,110	0,06	0,100			
	Redução média em relação ao controle (-)					
VE	-0,02 aA	-0,018 bcA	-0,015 cA			
FL	-0,01 aB	-0,04 aA	-0,060 aA			
VE+P	-0,006 bA	-0,013 cA	-0,003 dA			
FL+P	-0,0b B	-0,03 bA	-0,03 bA			
DMS <sub>1</sub>		0,01				
DMS <sub>2</sub>		0,01				

Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada genótipos e maiúsculas genótipos dentro de cada tratamento pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). VE - Restrição hídrica na fase vegetativa; FL - restrição hídrica no florescimento; P - aplicação de ácido pirúvico. DMS1 e DMS2 - diferença média significativa dos tratamentos em cada genótipo e DMS2 - diferença média significativa dos genótipos em cada tratamento.

Quando o déficit hídrico foi imposto na fase vegetativa (VE), notou-se maiores reduções na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*) sobre os genótipos CNPA 7MH (11,7%) e FM 966 (7,95%), diferindo do BRS Seridó (3,6%). Quando ocorreu no florescimento (FL), o FM 966 CNPA 7MH foram sensíveis ao déficit hídrico, com reduções de 37,2 e 42,2% na *A*, enquanto que em BRS Seridó, de 9,9%. Ao ser aplicado o ácido pirúvico em plantas sob déficit hídrico na fase vegetativa (VE+P) houve aumento na taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> na ordem de 3 e 6%, respectivamente, sem diferença significativa entre os genótipos, no entanto, na fase de florescimento (FL+P), constatou-se maior redução na *A* para o CNPA 7MH (Tabela 5).

Ao desdobrar os tratamentos dentro de cada genótipo, em BRS Seridó, as plantas submetidas ao tratamento VE+P obtiveram as menores reduções na *A* (0,7%), enquanto que o tratamento FL foi responsável pelas maiores reduções (9,9%). Em CNPA 7MH e FM 966, as menores reduções na *A* foram dos tratamentos VE e VE+P, e as maiores reduções foram obtidas com o tratamento FL (Tabela 5). Em pesquisa realizada por Cordão et al (2018), com duas cultivares de algodão BRS 286 e BRS 336 sob 14 dias de déficit hídrico aplicado nas diferentes fases fenológicas da cultura, os autores identificaram alterações na condutância estomática e na transpiração, no entanto, a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> não foi afetada.

As trocas gasosas são parâmetros interligados. A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> é um processo final decorrente da abertura estomática no processo de assimilação de carbono, sendo o processo chave que reflete o estado fisiológico da planta. A restrição hídrica na fase de florescimento comprometeu de forma substancial a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> em ambos os genótipos, provavelmente, como resultado de diferentes fatores interligados, a exemplo das maiores reduções na condutância estomática, transpiração e eficiência instântanea da carboxilação (Tabelas 4 e 5).

A abertura estomática é regulada pela variação de água no solo, mantendo um equilíbrio ótimo entre a transpiração e a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (Martins et al. 2016). No entanto, quando a planta reduz a abertura estomática, o fluxo de CO<sub>2</sub> nos cloroplastos é comprometido, reduzindo a disponibilidade de substrato para que ocorra a reação de carboxilação da Rubisco (Zhou et al. 2014). Além disso, o aumento na *C<sub>i</sub>* em plantas submetidas a restrição hídrica pode estar envolvida na redução da taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, uma vez que, apesar de existir uma grande quantidade de carbono na célula, o mesmo não estava sendo metabolizado, o que pode ser comprovado pela eficiência instântanea da carboxilação (Tabela 5).

Para eficiência instântanea da carboxilação não teve diferença significativa entre os genótipos quando submetidos ao déficit hídrico na fase vegetativa com e sem aplicação do ácido pirúvico (VE e VE+P). No florescimento (FL e FL+P), as maiores reduções em CNPA 7MH e FM 966. Analisando os tratamentos dentro de cada genótipo, constatou-se que em BRS Seridó as menores reduções foram observadas com os tratamentos VE+P e FL+P, enquanto que para o CNPA 7MH e FM 966 do tratamento VE+P (Tabela 5).

Aos 115 DAE, observou-se que nas plantas submetidas ao déficit hídrico na fase vegetativa (VE), houve redução na altura de planta no genótipo CNPA 7MH, diferindo

de BRS Seridó e FM 966, resultados similares aos tratamentos FL, VE+P e FL+P (Tabela 6).

Ao comparar os tratamentos dentro de cada genótipo, notou-se em BRS Seridó menores alturas nas plantas submetidas a restrição hídrica na fase vegetativa (VE) e no florescimento (FL), no entanto, ao ser com a aplicação de ácido pirúvico aumentou de 4,8 e 5,2%, respectivamente, com os tratamentos VE+P e FL+P em relação as plantas que não receberam ácido pirúvico (Tabela 6).

Para CNPA 7MH, o tratamento FL subsidiou redução de 24,5% na AP, no entanto, ao ser aplicado o ácido pirúvico foi de 20,4%. No algodoeiro FM 966 redução de 26,99% na AP com tratamento FL e as menores reduções nos tratamentos VE+P (10,6%) e FL+P (13,0%) (Tabela 6). Tais resultados demonstram que, o ácido pirúvico conseguiu amenizar os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre a planta. Estudos relacionados a deficiência hídrica com aplicação de substâncias de forma exógena também foram feitos por Mekki et al. (2015), ao avaliarem o efeito da aplicação exógena de ácido ascórbico, glutathiona e  $\alpha$ -tocoferol no crescimento, produtividade do algodão sob estresse hídrico, mostrando que a pulverização com ASC, GSH e  $\alpha$ -TOC aumentou o crescimento das plantas.

**Tabela 6.** Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para altura de planta (AP) e diâmetro da haste (DH) aos 115 DAE de genótipos de algodoeiros sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fase fenológica

Tratamentos	Dados médios					
	AP			DH		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
Controle	119,0	152,5	105,0	11,31	11,19	11,8
VE	103,5	118,5	86,76	10,0	10,78	11,05
VE+P	108,5	131,5	93,8	10,16	10,55	11,02
FL	103,6	115,0	73,66	7,6	9,66	9,76
FL+P	109,0	121,3	91,33	8,9	9,73	10,78
	Redução em relação ao controle (-)					
VE	-15,50 aB	-34,0 bA	-18,23 bB	-1,31 cA	-1,11 bA	-0,75 bA
FL	-15,4 aC	-37,50 aA	-31,33 aB	-3,69 aA	-2,23 aB	-2,03 aB
VE+P	-10,50 bB	-21,0 cA	-11,16 cB	-1,14 cA	-1,34 bA	-0,77 bA
FL+P	-10,0 bC	-31,16 bA	-13,16 cB	2,41 bA	-2,16 aA	-1,016 bB
DMS1		3,39			0,70	
DMS2		3,07			0,64	

Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada genótipos e maiúsculas genótipos dentro de cada tratamento pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). VE - Restrição hídrica na fase vegetativa; FL - restrição hídrica no florescimento; P - aplicação de ácido pirúvico. DMS1 - diferença média significativa dos tratamentos em cada genótipo e DMS2 - diferença média significativa dos genótipos em cada tratamento.

Para o diâmetro da haste aos 115 DAE (Tabela 6) não se observou diferença significativa entre os genótipos quando submetidos aos tratamentos VE e VE+P. A restrição hídrica na fase de florescimento resultou em maiores reduções no diâmetro da haste do BRS Seridó diferindo estatisticamente de CNPA 7MH e FM 966.

Ao analisar os tratamentos em cada genótipo, em BRS Seridó e FM 966, as maiores reduções no DH com o tratamento FL. Em CNPA 7MH as maiores reduções foram em FL e FL+P, que não diferiram entre si. Pois, o déficit hídrico quando aplicado em uma fase de maior requerimento de água pela cultura pode restringir o processo de divisão celular e, conseqüentemente, o crescimento das plantas. Cordão et al. (2018) ao avaliarem o crescimento das cultivares de algodoeiro BRS 286 e BRS 336 sob déficit hídrico, encontraram redução nas variáveis de crescimento do algodoeiro, quando o déficit foi aplicado na fase de crescimento inicial, botão floral e abertura da flor.

Reduções no número de capulhos (Ncap), quando as plantas foram submetidas a restrição hídrica na fase vegetativa (VE), foram observadas em CNPA 7MH e FM 966 diferindo de BRS Seridó. Quando a restrição hídrica ocorreu no florescimento da cultura, houve reduções no Ncap do FM 966. A aplicação de ácido pirúvico na fase vegetativa subsidiou menores diminuições no número de capulhos em BRS Seridó diferindo estatisticamente do CNPA 7MH e FM 966. Quando foi aplicado na fase de florescimento, as menores reduções foram em BRS Seridó e CNPA 7MH. Em BRS Seridó e FM 966, as menores reduções no número de capulhos quando as plantas foram submetidas ao tratamento VE+P. Em CNPA 7MH sem diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 7).

**Tabela 7.** Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para número de capulhos (Ncap) e massa de capulhos (Mcap) de genótipos de algodoeiros sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica

Tratamentos	Dados médios					
	Ncap			Mcap		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
Controle 1	10,0	9,0	12,4	52,82	39,0	70,19
VE	7,6	4,6	7,0	36,58	22,84	30,19
VE+P	9,4	5,6	8,3	41,69	39,0	52,05
FL	4,0	4,3	5,3	26,39	22,44	30,52
FL+P	5,3	5,3	6,1	31,85	25,85	35,66
	Diferença média em relação ao controle					
VE	-2,4 bB	-4,4 aA	-5,4 abA	-16,24 bB	-16,16 aB	-40,0 aA
FL	-6,0 aAB	-4,7 aB	-7,1 aA	-26,43 aB	-16,56 aC	-39,67 aA
VE+P	-0,6 cB	-3,4 aA	-4,1 bA	-11,13 cB	-0,0 bC	-18,14 cA
FL+P	-4,7 aB	-3,7 aB	-6,3 aA	-20,97 bB	-13,15 aC	-34,53 bA
DMS1		1,72			4,77	



DMS2	1,56	4,32
------	------	------

Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada genótipo e maiúsculas genótipos dentro de cada tratamento pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). VE – déficit hídrico na fase vegetativa; FL – déficit hídrico no florescimento; P - aplicação de ácido pirúvico. DMS1 - diferença média significativa dos tratamentos em cada genótipo e DMS2 - diferença média significativa dos genótipos em cada tratamento.

Para massa de capulhos, as plantas do algodoeiro FM 966 quando submetidas a restrição hídrica na fase vegetativa e florescimento, com e sem aplicação de ácido pirúvico, obtiveram maiores reduções quando comparado com BRS Seridó e CNPA 7MH. O tratamento VE+P subsidiou baixas reduções na Mcap, enquanto que as plantas submetidas ao tratamento FL tiveram altas reduções, em todos os genótipos estudados (Tabela 7).

Os dados apresentados corroboram com os de Zonta et al. (2017) que também tiveram perdas no rendimento da cultura do algodoeiro, quando aplicado o déficit hídrico no florescimento. Almeida et al. (2017) com reduções no número de capulhos e na produtividade; e Maniçoba et al. (2021) com menor rendimento quando o déficit hídrico foi aplicado durante a abertura da primeira flor e o pico do florescimento.

Provavelmente, o déficit hídrico no florescimento promoveu baixa translocação de assimilados para os tecidos reprodutivos, com queda de botões florais, abortamento de flores e maçãs, acarretando, em menor massa e número de capulhos por planta (Abdelraheem et al., 2019). Tendência similar aos componentes anteriores foi observada para produção de algodão em caroço (Tabela 8). O genótipo FM 966 obteve maior redução quando submetido a restrição hídrica na fase vegetativa (VE) do que o BRS Seridó e CNPA 7MH. Na fase de florescimento (FL), as maiores reduções foram com BRS Seridó e FM 966 diferindo de CNPA 7MH. Quando as plantas foram tratadas com ácido pirúvico, na fase vegetativa (VE+P) não houve diferença entre os genótipos. No entanto, na fase de florescimento (FL+P) as menores reduções foram observadas com o genótipo CNPA 7MH. As plantas de ambos os genótipos quando submetidos ao déficit hídrico na fase vegetativa + aplicação de ácido pirúvico (VE+P), obtiveram maior produção de algodão em caroço em relação aos tratamentos VE, FL e FL+P.

**Tabela 8.** Dados médios e diferença média dos tratamentos em relação ao controle para produção de algodão em caroço (Pac) de genótipos de algodoeiros sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico variando a fenológica

Tratamentos	Dados médios		
	Pac (g por planta)		
	BRS Seridó	CNPA 7MH	FM 966
Controle	36,89	29,66	37,83
VE	24,72	18,82	22,57
VE+P	35,45	26,53	34,52
FL	19,27	15,40	19,75
FL+P	25,30	20,67	26,49
	Diferença média em relação ao controle		
VE	-12,17 bB	-10,84 bB	-15,26 bA
FL	-17,62 aA	-14,26 aB	-18,08 aA
VE+P	1,44 cA	-3,13 cA	-3,31 dA
FL+P	-11,59 bA	-8,99 bB	-11,34 cA
DMS1	2,44		
DMS2	2,21		

Letras minúsculas comparam tratamentos dentro de cada genótipos e maiúsculas genótipos dentro de cada tratamento pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). VE - Restrição hídrica na fase vegetativa; FL - restrição hídrica no florescimento; P - aplicação de ácido pirúvico. DMS1 - diferença média significativa dos tratamentos em cada genótipo e DMS2 - diferença média significativa dos genótipos em cada tratamento.

As plantas de ambos os genótipos quando submetidas ao déficit hídrico na fase vegetativa + aplicação de ácido pirúvico (VE+P), conseguiram maior produção de algodão em caroço em relação aos tratamentos VE, FL e FL+P. Resultados promissores do piruvato também indicados por Dias (2021) ao estudar o déficit hídrico e a aplicação foliar de piruvato de cálcio em diferentes fases do algodoeiro BRS Jade. O suprimento exógeno de piruvato na concentração de 100 mM, atenuou os efeitos do déficit hídrico das plantas na fase vegetativa, refletindo no aumento da massa de capulho completo, massa de pluma com semente e número de capulhos por planta. A suplementação de piruvato de cálcio também refletiu na melhor eficiência do uso da água ( $1,32 \text{ g L}^{-1}$ ).

As reduções nos componentes de produção observados na presente pesquisa para BRS Seridó e CNPA 7MH, atestam a flexibilidade genética delas quando submetidas a condições de seca. Ambos os materiais têm uma base genética forte, em virtude da contribuição de seus progenitores que são constituídos de alelos que favorecem uma maior tolerância a restrição hídrica, fato encontrado frequentemente em regiões semiárida (Rodrigues et al., 2016). Isso pode explicar o comportamento da CNPA 7MH, que apesar de reduzir as trocas gasosas na época da restrição hídrica, quando da reidratação, as plantas foram capazes de se recuperarem, obtendo menores perdas na produção. Almeida et al. (2017) ao estudarem o efeito do déficit hídrico aplicados nas diferentes fases fenológicas das cultivares de algodoeiro herbáceo BRS 286 e BRS 336 encontraram

reduções no número de capulhos por planta e na produtividade. Cordão et al. (2018) analisando as mesmas cultivares submetidas a déficit hídrico em diferentes fases observaram que a fase de florescimento foi mais sensível ao déficit hídrico por apresentarem menor produção.

Para corroborar com os resultados apresentados na análise univariada, foi realizada uma análise multivariada dos dados através de componentes principais. Os dois primeiros componentes principais permitiram explicar 84,95% da variância contida nas variáveis originais (Tabela 9). Foram consideradas como relevantes as cargas com valor absoluto superior a 0,6. O primeiro componente principal (CP<sub>1</sub>) contribuiu com 57,48% da variância total e foi composto pela combinação linear entre a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (-0,95), eficiência instantânea da carboxilação (-0,90) condutância estomática (-0,79), altura de planta (-0,77), produção de algodão em caroço (-0,72) e transpiração (-0,71). Enquanto que o CP<sub>2</sub> contribuiu com 27,47% e foi composto pelo número de capulhos por planta (-0,65) e massa de capulhos por planta (-0,83).

**Tabela 9.** Autovalores, variância, coeficientes de correlação entre Componentes Principais e variáveis.

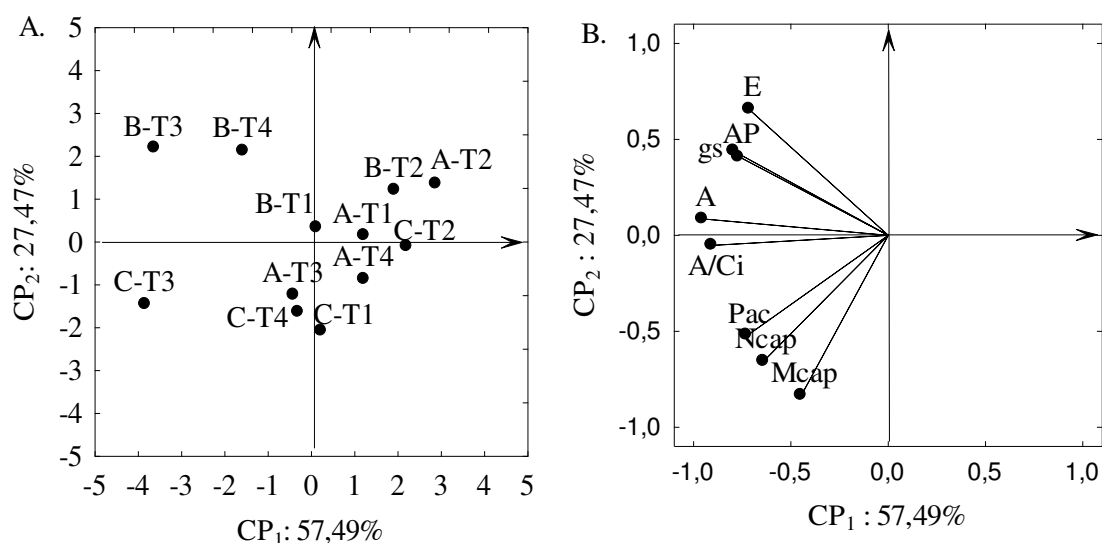
CPs	$\lambda$	S <sup>2</sup> %	Cargas fatoriais							
			<i>gs</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>A/Ci</i>	<i>AP</i>	<i>Ncap</i>	<i>Mcap</i>	<i>Pac</i>
CP <sub>1</sub>	4,59	57,48	-0,79*	-0,71*	-0,95*	-0,90*	-0,77*	-0,64	-0,44	-0,72*
CP <sub>2</sub>	2,19	27,47	0,43	0,65	0,08	-0,05	0,41	-0,65*	-0,83*	-0,52

CPs: componentes principais;  $\lambda$ : autovalores; S<sup>2</sup>%: porcentagem de variância explicada; \*: variáveis consideradas no CP; r = 0,10-0,39 (fraca), 0,40-0,69 (moderada) e de 0,70-1,00 (forte).

As projeções bidimensionais dos efeitos dos tratamentos e das variáveis sobre o primeiro e o segundo componente principal (CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>) estão representados na Figura 2A e B. Os dois componentes principais construídos a partir das informações originais, retratam com precisão os tratamentos e as características responsáveis pelas diferenças entre esses sistemas.

No CP<sub>1</sub>, verifica-se que, as reduções mais expressivas na condutância estomática (*gs* - 0,14 e 0,11 mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e transpiração (*E* - 1,81 e 1,39 mmol de H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), ocorreram com os genótipos CNPA 7MH quando submetidos ao déficit hídrico na fase de florescimento com e sem aplicação de ácido pirúvico (B-T3 e B-T4). A taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*), eficiência instantânea da carboxilação (*A/Ci*) e produção de algodão em caroço (*Pac*) reduziram com maior intensidade no genótipo FM 966 sob déficit hídrico no florescimento (C-T3). No CP<sub>2</sub>, a maior redução no número de capulhos (*Ncap*-7,09) e

massa de capulhos (Mcap-39,67) por plantas também com o genótipo FM 966 sob déficit hídrico no florescimento (C-T3).



**Figura 2:** Projeção bidimensional (Biplot) dos tratamentos (A) e correlação de variáveis (B) de genótipos de algodão sob déficit hídrico e aplicação de ácido pirúvico nos dois primeiros Componentes Principais (CP<sub>1</sub> e CP<sub>2</sub>). A - genótipo BRS Seridó, B - genótipo CNPA 7MH, C- genótipo FM 966, T1 - déficit hídrico na fase vegetativa, T2 - déficit hídrico na fase vegetativa + aplicação de ácido pirúvico, T3 - déficit hídrico no florescimento, T4 - déficit hídrico no florescimento + aplicação de ácido pirúvico.

## CONCLUSÕES

As trocas gasosas e o crescimento do algodoeiro BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966 reduzem com maior intensidade quando o déficit hídrico é aplicado no florescimento.

O número de capulhos, massa de capulhos e a produção de algodão em caroço do algodoeiro FM 966, reduz significativamente com o déficit hídrico na fase de florescimento.

A aplicação de 100  $\mu$ M de ácido pirúvico minorou os efeitos da restrição hídrica sob a produção de algodão em caroço em BRS Seridó, CNPA 7MH e FM 966.

## AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA/UFMG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos e a Embrapa Algodão pelo espaço disponibilizado para realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS CITADAS

- Abdelraheem, A.; Esmaeili, N.; O'Connell, M.; Zhang, J. Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton. *Industrial Crops and Products*, v.130, p.118-129, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.070>
- ABRAPA - Associação brasileira de produtores de algodão. Números do algodão: o algodão no Brasil. Disponível em: <http://www.abrapa.com.br/Paginas/dados/algodaono-brasil.aspx>. Acesso em 11 de outubro de 2019.
- Almeida, E. S. A.B.; Pereira, J. R.; Azevedo, C. A. V.; Araújo, W. P.; Zonta, J. H.; Cordão, M. A. Algodoeiro herbáceo submetido a déficit hídrico: Produção. *Agropecuária Científica no Semiárido*. v.13, p.22-28, 2017.
- Alves, F. A. L.; Cavalcante, F. S, Oliveira-Júnior, I. S.; Ferraz, I.; Siqueira, S. M. Competição de variedades de algodão herbáceo para cultivo no agreste pernambucano. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, v.24, p.1-8, 2019. <https://doi.org/10.12661/pap.2019.003>
- Barbosa, D. D.; Fernandes, P. D.; Marcelino, A. D. A. de L.; Silva, F. de A.; Dias, M. dos S.; Silva, C. R. C.; Santos, R. C. Exogenous pyruvate mitigates the detrimental effects of water stress in contrasting peanut genotypes. *Genetics and Molecular Research*. v.20, p.1-14, 2021. <https://doi.org/10.4238/gmr18907>
- CONAB - Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, v.8, sétimo levantamento, 2021.
- Cordão, M. A.; Araújo, W. P.; Pereira, J. R.; Zonta, J. H.; Ferreira, F. N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico aplicado em fases fenológicas. *Revista Verde*, v.13, p.313-321, 2018. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i3.5933>
- Dias, M. S. Ecofisiologia do algodoeiro sob estresse hídrico variando a fase fenológica e a suplementação de piruvato. *Disertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)*, Universidade Federal de Campina grande, 71 fl., 2021.
- Echer, F. R.; Oosterhuis, D. M.; Loka, D. A.; Rosolem, C. A. High night temperatures during the floral bud stage increase the abscission of reproductive structures in cotton. *Journal of agronomy and crop science*, v.200, p.191-198, 2014. <https://doi.org/10.1111/jac.12056>
- Ferreira, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, v.37, p.529-535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Govaerts, B.; Sayre, K. D.; Lichter, K.; Dendooven, L.; Deckers, J. Influence of permanent planting in high bed and residue management on physical and chemical soil quality in rainfed corn/wheat systems. *Plant and Soil*, v.291, p.39-54, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9172-6>

- Hair, F. J.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. Análise multivariada de dados. 6. ed. Tradução Sant'Anna, A. S. Porto Alegre: Bookman. 2009. 688p.
- Lima, R. F.; Araújo, W. P.; Pereira, J. R., Cordão, M. A., Ferreira, F. N.; Zonta, J. H. Fibras de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.13, p.427-436, 2018. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i4.5940>
- Lisar, S. Y. S.; Motafakkerzad, R.; Hossain, M. M.; Rahman, I. M. M. Water stress in plants: causes, effects and responses. In Rahman, I. M. M, *Water Stress*, Rijeka: INTECH, p.1-14, 2012.
- Maniçoba, R. M.; Sobrinho, J. E.; Zonta, J. H.; Junior, E. G. C.; Oliveira, A. K. S.; Silva Freitas, I. A. Resposta do algodoeiro à supressão hídrica em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. *Irriga*, v.26, p.123-133, 2021. <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n1p123-133>
- Martins SCV, McAdam SAM, Deans RM, DaMatta FM, Brodrribb TJ (2016) Stomatal dynamics are limited by leaf hydraulics in ferns and conifers: results from simultaneous measurements of liquid and vapour fluxes in leaves. *Plant Cell Environ* 39: 694–705. <https://doi.org/10.1111/pce.12668>
- Mekki, B. E. D., Hussien, H. A., & Salem, H. Role of glutathione, ascorbic acid and  $\alpha$ -tocopherol in alleviation of drought stress in cotton plants. *International Journal of ChemTech Research*, v.8, p.1573-1581, 201
- Niu, J.; Zhang, S.; Liu, S.; Ma, H.; Chen, J.; Shen, Q.; Zhao, X. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress. *Journal of plant physiology*, v.224, p.30-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.001>
- Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A. J. *Métodos de pesquisa em fertilidade do solo*. Brasília: Embrapa-SEA. 1991, p.189-253.
- Rodrigues, J. D.; Silva, C. R. C.; Pereira, R. F.; Ramos, J. P. C.; Melo Filho, P. A.; Cavalcanti, J. J. V.; Santos, R. C. Characterization of water-stress tolerant cotton cultivars based on plant growth and in activity of antioxidant enzymes. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, p. 3763-3770, 2016. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11301>
- Shen, J. L.; Li, C. L.; Wang, M.; He, L. L.; Lin, M. Y.; Chen, D. H.; Zhang, W. Mitochondrial pyruvate carrier 1 mediates abscisic acid-regulated stomatal closure and the drought response by affecting cellular pyruvate content in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plant Biology*, v.17, p.217, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1175-3>
- Snowden, C.; Ritchie, G.; Cave, J.; Keeling, W.; Rajan, N. Multiple irrigation levels affect boll distribution, yield, and fiber micronaire in cotton. *Agronomy Journal*, v.105, p.1536-1544, 2013. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0084>

- Statsoft, I. N. C. Programa computacional Statistica 7.0. E. A. U. 2004.
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, D.; Teixeira, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Brasília: Embrapa. 2017, 573p.
- Ul-Allah, S.; Rehman, A.; Hussain, M.; Farooq, M. Fiber yield and quality in cotton under drought: Effects and management. *Agricultural Water Management*, v.255, p.106994, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106994>
- Vison, C. C.; Mota, A. P. Z.; Oliveira, T. N.; Guimaraes, L.A.; Leal-Bertioli; S.C.M.; Williams T. C. R. Nepomuceno, A. L.; Saraiva, M. A. P; Araujo, A. C. G.; Guimaraes, P. M.; Brasileiro A. C. M. Early responses to dehydration in contrasting wild *Arachis* species. *PLoS One*, v.13, p.1-28, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198191>
- Zonta, J. H.; Brandão, Z. N.; Rodrigues, J. I. da S.; Sofiatti, V. Cotton response to water deficits at different growth stages. *Revista Caatinga*, v.30, p.980-990, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n419rc>
- Zonta, J. H.; Brandão, Z. N.; Sofiatti, V.; Bezerra, J. R. C.; Medeiros, J. C. Irrigation and nitrogen effects on seed cotton yield, water productivity and yield response factor in semi-arid environment. *Australian Journal of Crop Science*, v.10, p.118-126, 2016.
- Zhou S, Medlyn B, Sabaté S, Sperlich D, Prentice IC, Whitehead D. Short-term water stress impacts on stomatal, mesophyll and biochemical limitations to photosynthesis differ consistently among tree species from contrasting climates. *Tree Physiol* 34: 1035–1046, 2014. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu072>