

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

NATHAN MICHAEL RODRIGUES DE PAIVA

ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS NO SOLO E FOTOSSÍNTESE DE ALGODOEIRO
COM O USO DO ADUBO BIOLÓGICO MICROGEO

Uberlândia

2024

NATHAN MICHAEL RODRIGUES DE PAIVA

**ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS NO SOLO E FOTOSSÍNTESE DE ALGODOEIRO
COM O USO DO ADUBO BIOLÓGICO MICROGEO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Agronomia
apresentado ao Instituto de Ciências Agrárias da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Prof. Dra. Larissa Barbosa de Sousa

UBERLÂNDIA

2024

NATHAN MICHAEL RODRIGUES DE PAIVA

**ALTERAÇÕES BIOLÓGICAS NO SOLO E FOTOSSÍNTESE DE ALGODOEIRO
COM O USO DO ADUBO BIOLÓGICO MICROGEO**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Agronomia apresentado ao Instituto de
Ciências Agrárias da Universidade Federal
de Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Uberlândia, 12 de abril de 2024

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Larissa Barbosa de Sousa
Orientador

Eng. Agrônomo Mestre Elvécio Gomes Da Silva Júnior
Membro da banca examinadora

Eng. Agrônomo Dr. Daniel Bonifácio Oliveira Cardoso
Membro da banca examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, sabedoria e saúde durante todo o percurso deste trabalho. Sem Sua orientação, não teria sido possível chegar até aqui.

Aos meus pais e irmão, pelo apoio e suporte durante toda minha trajetória e por sempre acreditarem em mim. Vocês são minha maior motivação e fonte de inspiração. Sou eternamente grato por tudo que proporcionaram ao longo da minha vida.

A minha namorada Palloma de Oliveira agradeço por sempre me incentivar, acreditar no meu potencial, me motivando a dar o melhor de mim, e buscando sempre meios de ajudar no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a minha orientadora Dra. Larissa Barbosa De Sousa, por orientar cada etapa deste trabalho. Sua ajuda foi essencial para que este projeto fosse possível. Agradeço pela confiança e pelas valiosas orientações durante toda minha trajetória acadêmica.

Agradeço ao meu amigo Elvécio Júnior por todo o apoio durante a realização deste trabalho, com certeza sem a sua contribuição e ajuda nada disso seria possível. Meu muito obrigado por tudo!

Gratidão a Prof. Dra. Maria Cristina Sanches e ao Instituto de Biologia UFU por emprestar o equipamento IRGA, e pelas orientações durante o trabalho.

Aos amigos de graduação, pela troca de experiências e aprendizado mútuo. Juntos, criamos um ambiente de crescimento acadêmico e pessoal que certamente ficará marcado.

Agradeço também à Universidade Federal De Uberlândia, pela infraestrutura, pelos recursos e pela oportunidade de crescimento intelectual que me proporcionou.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho, meu sincero agradecimento. Cada gesto de apoio, colaboração e incentivo foi crucial para que esse momento se tornasse uma realidade. Meu muito obrigado!

RESUMO

O adubo biológico utiliza micro-organismos benéficos para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a eficiência na absorção dos nutrientes pelas plantas, o que proporciona uma melhor qualidade do solo. Este trabalho teve como objetivo analisar as alterações biológicas do solo e da fotossíntese de algodoeiro de fibras brancas com o uso do adubo biológico microgeo, com enfoque em avaliar a atividade microbiana, o carbono da biomassa microbiana, a enzima beta-glicosidase, e os parâmetros da fotossíntese. Foi utilizado o adubo biológico microgeo como tratamento, as sementes foram semeadas em vasos, sendo utilizado o delineamento inteiramente casualizado com 12 repetições, constituída cada uma por uma planta. Foi avaliado a Temperatura Foliar, Condutância estomática, Transpiração Foliar, Assimilação de CO₂, Consumo de CO₂, CO₂ subestomático, Eficiência da Utilização da Água, Eficiência da Carboxilação da Rubisco, Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese, Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente na Superfície Foliar, e foi realizada análise bioquímica do solo com enfoque em avaliar o carbono da biomassa microbiana e a enzima beta-glicosidase. Neste estudo, exploramos diversas medidas de eficiência e desempenho relacionadas à fotossíntese e ao uso de recursos pelas plantas, apresentando resultados altamente positivos, o que permitiu concluir a notável capacidade das plantas de otimizar o uso de recursos naturais, como água, CO₂ e luz solar, para promover seu crescimento e eficiência, adquiridas através da aplicação do adubo biológico Microgeo, principalmente até os 40 dias após a emergência. Para os parâmetros biológicos da enzima beta-glicosidase e carbono da biomassa microbiana (CBM) não foi encontrado diferença significativa até os 60 DAE.

Palavras-chave: adubo biológico, algodoeiro, fotossíntese.

ABSTRACT

The biological fertilizer uses beneficial microorganisms to improve soil fertility and increase the efficiency of nutrient absorption by plants, which provides better soil quality. This study aimed to analyze the biological changes in the soil and photosynthesis of white cotton fibers using Microgeo biological fertilizer, focusing on evaluating microbial activity, microbial biomass carbon, beta-glucosidase enzyme, and photosynthesis parameters. The Microgeo biological fertilizer was used as treatment; seeds were sown in pots using a completely randomized design with 12 repetitions, each consisting of one plant. Foliar Temperature, Stomatal Conductance, Leaf Transpiration, CO₂ Assimilation, CO₂ Consumption, Sub-stomatal CO₂ Concentration, Water Use Efficiency, Rubisco Carboxylation Efficiency, Photosynthetic Photochemical Efficiency, Photosynthetically Active Radiation Incident on Leaf Surface were evaluated. A biochemical analysis of the soil was performed focusing on evaluating microbial biomass carbon and beta-glucosidase enzyme. In this study, we explored various measures of efficiency and performance related to photosynthesis and resource use by plants presenting highly positive results. This allowed us to conclude that plants have a notable ability to optimize the use of natural resources such as water, CO₂, and sunlight for growth and efficiency through the application of Microgeo biological fertilizer mainly up to 40 days after emergence. For the beta-glucosidase enzyme's biological parameters and microbial biomass carbon (MBC), no significant difference was found until 60 days after emergence.

Keywords: Biological fertilizer, Cotton plant, Photosynthesis.

SUMÁRIO

<u>1 INTRODUÇÃO</u>	8
<u>2 MATERIAL E MÉTODOS</u>	11
2.1 Localização e condução do experimento	
2.2 Tratamentos	
2.3 Delineamento experimental	
2.4 Avaliação	
2.5 Análise estatística	
<u>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	13
<u>4 CONCLUSÃO</u>	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

O algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L) é originário da América Central, sendo considerado a fibra vegetal de maior importância mundial. A espécie foi domesticada a cerca de 4000 anos e é cultivada atualmente em mais de 60 países (ABRAPA, 2021). No Brasil, teve início em meados do século XVIII, em São Paulo, com a revolução industrial na Europa (EMBRAPA, 2019).

O algodoeiro possui grande importância socioeconômica para o Brasil, pois é a mais importante fonte natural de fibras, além de garantir ao país excelentes dados no cenário internacional, como um dos quatro maiores produtores mundiais, ao lado da China, Índia, Estados Unidos e Paquistão. Para a safra 2023/2024, as primeiras estimativas apontam para um crescimento de 8,4% na área plantada com algodão, que deve chegar a 1,81 milhão de hectares, com produção, preliminarmente aguardada, de 3,29 milhões de toneladas, 2% a mais em relação à safra recém-colhida (ABRAPA, 2023). Além disso, o algodoeiro é considerado uma planta de aproveitamento integral (fibra, semente, planta), sendo usada como matéria-prima na indústria têxtil, alimentícia, de ração animal, de cosméticos, farmacêutica, de celulose, entre outras, o que resulta em uma cadeia produtiva das mais longas e complexas (NETO, 2009).

Diante disso, a produção de algodão exige o uso intensivo de fertilizantes para garantir o crescimento vigoroso das plantas e a obtenção de altas produtividades. No entanto, o uso de fertilizantes químicos pode trazer impactos negativos ao meio ambiente, comprometendo a qualidade do solo e contaminando os recursos hídricos. Sendo assim, busca-se alternativas sustentáveis para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade do solo sem impactar negativamente o meio ambiente, e a principal alternativa é com o uso de adubo biológico, que consiste em uma alternativa sustentável, utilizando micro-organismos benéficos para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a eficiência na absorção dos nutrientes pelas plantas.

Para construir um solo de qualidade é necessário o restabelecimento do microbioma do solo, dessa forma, a biomassa microbiana do solo é um aspecto que deve ser analisado, por ser considerada a parte viva e mais ativa da matéria orgânica, geralmente expressa em μg de C g^{-1} de solo seco ou mg de C kg^{-1} de solo seco (REIS JUNIOR; MENDES, 2007). Essa biomassa é constituída por fungos, bactérias, enzimas e actinomicetos que atuam em processos que vão desde a formação do solo

(intemperização das rochas) até a decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, biorremediação de áreas contaminadas por poluentes, entre outros (REIS JUNIOR; MENDES, 2007). A biomassa microbiana representa, em média, 2 % a 5% do C orgânico e 1 % a 5% do nitrogênio (N) total do solo, e por atuarem nos processos de mineralização/imobilização, os microrganismos do solo são considerados fonte e dreno de nutrientes (REIS JUNIOR; MENDES, 2007).

A biomassa microbiana é um dos componentes que controla a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica e as transformações envolvendo os nutrientes minerais (REIS JUNIOR; MENDES, 2007). A decomposição depende dos processos de transformação da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, por meio dos quais pode-se mensurar a qualidade do solo, determinando-se os valores do carbono da biomassa microbiana (PEREZ, 2004).

Quando se fala de qualidade do solo não basta olhar somente sob os aspectos físicos e químicos, mas vários dos seus componentes biológicos devem estar ativos e funcionais no seu interior, como as enzimas do solo.

Enzimas são proteínas cuja função é exercer atividade catalizadora nas reações químicas, isto é, são peças fundamentais nas reações metabólicas, sendo responsáveis pelo funcionamento e manutenção dos seres vivos, participando de processos como ciclagem de nutrientes, decomposição de substâncias orgânicas e formação da matéria orgânica. As enzimas encontradas no solo são, principalmente, metabolizadas pelos microrganismos, mas também podem ter origem vegetal e animal (MICROGEO, 2023).

A inibição das enzimas, chamada de inibição enzimática, é um dos processos de maior impacto à qualidade do solo, assim como a baixa diversidade microbiológica do solo. Nesse contexto, a atividade enzimática no solo tem sido usada como bioindicador da qualidade dos solos (MICROGEO, 2023).

Ademais, é de comum saber que a fotossíntese é o principal processo biológico do planeta Terra, sendo responsável pela produção da maior parte do oxigênio atmosférico e energia metabólica. Neste processo, os seres autotróficos utilizam a energia da luz solar para sintetizar carboidratos, utilizando gás carbônico (CO₂) e água, liberando gás oxigênio (O₂) (Kaiser et al. 2019).

Dentre as ferramentas utilizadas para avaliar a capacidade fotossintética das plantas, podemos destacar as análises de trocas gasosas em sistemas abertos, que utilizam analisadores de gases por infravermelho (InfraRed Gas Analyzer – IRGA). Tais ferramentas possibilitam realizar medidas de parâmetros como a taxa de assimilação do CO₂ (A), condutância estomática (gS) e taxa de transpiração (E) em tempo real, fornecendo informações sobre o estado fisiológico das plantas e sobre a ocorrência de condições de estresse (HENSCHER, 2021).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar as alterações biológicas do solo e da fotossíntese de algodoeiro de fibras brancas com o uso do adubo biológico microgeo, com enfoque em avaliar a atividade microbiana, o carbono da biomassa microbiana, a enzima beta-glicosidase, e os parâmetros da fotossíntese.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e condução do experimento

O experimento foi conduzido na casa de vegetação da Fazenda Capim Branco (18°52'S; 48°20'W e 805 m de altitude) pertencente a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no município de Uberlândia, Minas Gerais.

Foram utilizados vasos de plástico contendo 3kg de solo retirado da própria fazenda da camada de 0-10 cm, onde se tem uma maior atividade de microrganismos.

Foi utilizado no experimento a cultivar FM985GLTP, sendo semeadas 4 sementes de algodão por vaso e após a emergência foi realizado o desbaste, mantendo duas plantas por vaso. Os vasos foram irrigados manualmente e diariamente durante todo o desenvolvimento da cultura.

Realizou-se adubação e manejo fitossanitário padrão para a cultura, além da aplicação de 300L/ha do adubo biológico microgeo em 50% dos vasos, e os outros 50% dos vasos não receberam o adubo biológico microgeo, sendo as testemunhas.

2.2 Tratamentos

1. Com microgeo 300L/ha
2. Testemunha

2.3 Delineamento experimental

Utilizou-se no experimento o delineamento inteiramente casualizado (DIC), consistindo em dois tratamentos com 12 repetições para cada tratamento, sendo cada planta uma repetição. Cada parcela experimental foi constituída de 1 vaso contendo duas plantas.

2.4 Avaliação

Foram realizadas avaliações dos parâmetros da fotossíntese (Temperatura Foliar, Condutância Estomática, Transpiração Foliar, Assimilação De CO₂, Consumo De CO₂, CO₂ Subestomático, Eficiência Da Utilização Da Água, Eficiência Da Carboxilação Da Rubisco, Eficiência Fotoquímica Da Fotossíntese, e Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente Na Superfície Foliar), utilizando o aparelho irga com 20, 40 e 60 dias após a emergência. Cada avaliação foi feita com duas análises de folhas por vaso, logo, realizou-se 12 avaliações das plantas que receberam o adubo biológico microgeo e 12 avaliações

das plantas testemunhas, repetindo-se essa avaliação a cada 20 dias e eliminando os vasos já avaliados.

Além disso, foi executado uma análise bioquímica do solo com 60 dias após a emergência do algodoeiro, onde analisou-se a enzima beta-glicosidase, umidade, e o carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS).

2.5 Análise estatística

Foi conduzido o experimento em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com subdivisão no tempo (20, 40 e 60 dias após a emergência). Os resultados foram analisados por comparação das médias pelo teste T de Student ao nível de 5% de significância, utilizando o programa R Core Team (2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura foliar (Tleaf) °C

A temperatura foliar refere-se à temperatura das folhas de uma planta ou árvore específica. É importante notar que a temperatura foliar pode variar em relação à temperatura ambiente, uma vez que as folhas podem absorver e refletir a radiação solar de maneira diferente, e também podem ser afetadas por fatores como a umidade e o vento (TRIBUZY, 2005).

As plantas regulam sua temperatura foliar por meio de um processo chamado termorregulação. Isso envolve uma série de adaptações fisiológicas e morfológicas que lhes permitem manter a temperatura foliar dentro de uma faixa ótima para seu crescimento e funcionamento. Quando as temperaturas estão muito altas, as plantas podem perder água por meio da transpiração e podem sofrer danos pelo calor. Por outro lado, temperaturas muito baixas podem desacelerar as reações metabólicas e afetar negativamente seu desenvolvimento (AGROTÉCNICO, 2024).

Na pesquisa agrícola e biológica, o estudo da temperatura foliar é importante para entender como as plantas respondem a diferentes condições ambientais e como podem se adaptar para melhorar sua resistência ao estresse térmico.

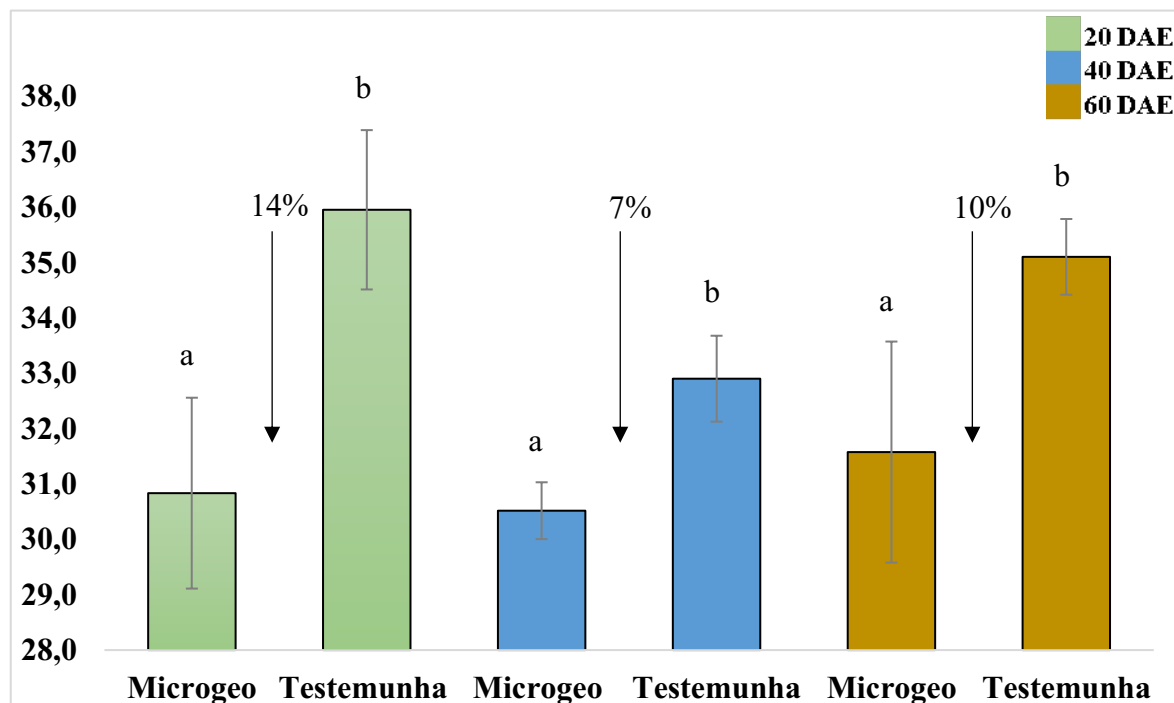


Figura 1. Temperatura foliar (Tleaf) em °C da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

A faixa de temperatura ideal para o desenvolvimento da planta do algodão, da emergência à floração, está compreendida entre 24 °C e 34 °C (WADDLE, 1984). Logo,

as plantas que receberam o tratamento com microgeo respeitaram essa faixa, variando de 30,5 a 31,6 graus celsius (Figura 1). Já as testemunhas com 20 e 60 DAE ultrapassaram a faixa ideal de temperatura, atingindo a maior média de 36 graus celsius com 20 DAE, acarretando em possível perda de água por meio da transpiração (Figura 1).

Em situações de alta temperatura foliar, como ocorreu nas testemunhas com 20 e 60 DAE (Figura 1), a depender de quanto tempo este indivíduo ficou exposto, a temperatura pode causar danos na maquinaria fotossintética, tanto a nível enzimático, desestruturando ou desnaturando as enzimas envolvidas no processo de fixação do CO₂, como no nível dos fotossistemas, ocasionando a fotoinibição ou fotodestruição (TRIBUZY, 2005).

Condutância estomática (gs) mmol H₂O m⁻² s⁻¹

A condutância estomática é uma medida da facilidade com que os estômatos das folhas das plantas abrem e fecham para a troca de gases com a atmosfera. Os estômatos são pequenas aberturas microscópicas encontradas nas superfícies das folhas e, em algumas plantas, nos caules também. Eles desempenham um papel fundamental no processo de fotossíntese, permitindo que as plantas absorvam dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e liberem oxigênio (O₂) (SANTOS, 2024).

A condutância estomática é influenciada por diversos fatores, incluindo a luz, a umidade, a temperatura e a disponibilidade de água no solo. Quando os estômatos estão abertos, a condutância estomática é alta, o que significa que as trocas gasosas, como a absorção de CO₂ e a liberação de O₂, podem ocorrer facilmente. Por outro lado, quando os estômatos estão fechados, a condutância estomática é baixa, limitando a troca de gases com o ambiente (PAIVA, 2005).

A regulação da condutância estomática é crucial para que as plantas otimizem a fotossíntese, evitem a perda excessiva de água por transpiração e protejam-se contra condições adversas, como altas temperaturas e seca. A abertura e o fechamento dos estômatos são controlados principalmente pela pressão osmótica nas células-guarda que circundam os estômatos e pela ação de hormônios vegetais, como o ácido abscísico (ABA) e o ácido jasmônico (JA) (SANTOS, 2024).

Entretanto, para os parâmetros de condutância estomática não houve alterações significativas até os 60 dias após a emergência da cultura (Figura 2).

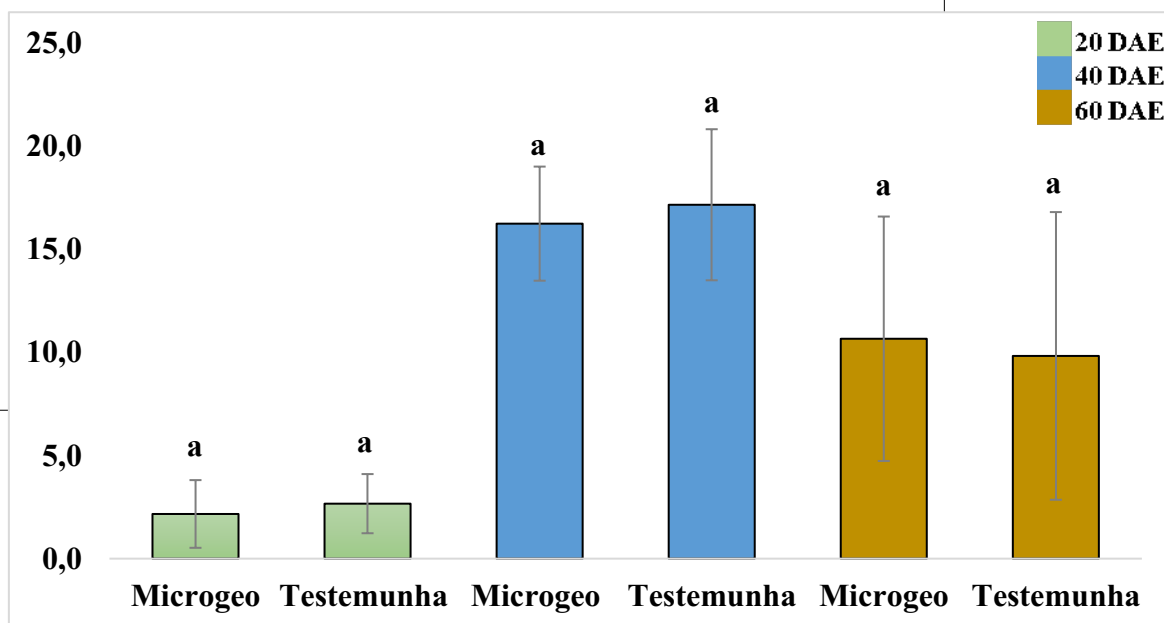


Figura 2. Condutância estomática (g_s) em $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

Transpiração foliar (E)

A transpiração foliar é o processo pelo qual as plantas perdem água na forma de vapor através dos estômatos. Esse processo é fundamental para o funcionamento das plantas e tem várias funções importantes, como a absorção de água e nutrientes, onde a transpiração cria uma pressão negativa na planta, conhecida como tensão, que ajuda a puxar a água e os nutrientes do solo através das raízes até as partes superiores da planta. Isso é essencial para o transporte de água e nutrientes para todas as partes da planta, incluindo as folhas, onde ocorre a fotossíntese (CARDOSO; COSTA, 2012).

Ademais, a transpiração foliar ajuda a resfriar as plantas, quando a água evapora dos estômatos, ela libera calor latente, o que esfria a folha e a planta como um todo. E também, a transpiração realiza o transporte de nutrientes e conserva energia, onde cria um fluxo contínuo de água e nutrientes dentro da planta, permitindo que os produtos da fotossíntese, como glicose e outros açúcares, sejam transportados para as partes que necessitam de energia ou armazenamento (CARDOSO; COSTA, 2012).

Sendo assim, a taxa de transpiração foliar é influenciada por fatores ambientais, como a umidade relativa do ar, a temperatura e a disponibilidade de água no solo, bem como pelas características da planta, como o tipo de folha e a presença de pelos foliares. O controle dos estômatos é crucial para regular a transpiração e evitar a perda excessiva de água em condições adversas.

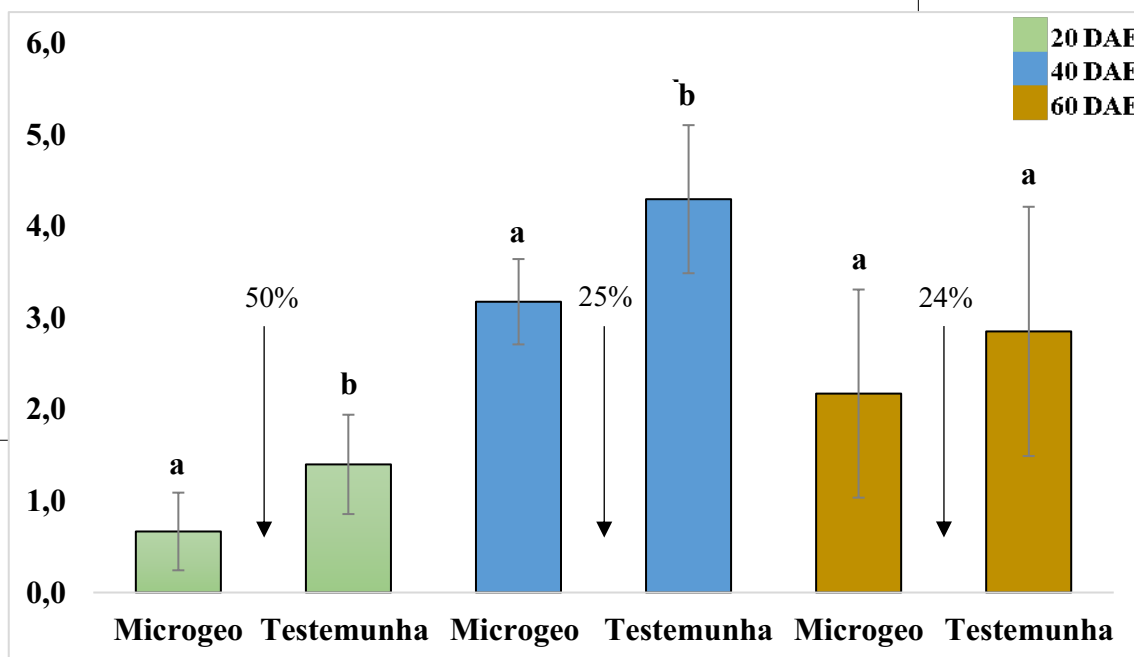


Figura 3. Transpiração foliar (E) em $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024)

No geral, houve maior transpiração foliar da testemunha quando comparada as plantas que receberam o tratamento microgeo, havendo diferenças significativas com 20 e 40 DAE (Figura 3). Como não houve diferenças significativas na condutância estomática entre os dois tratamentos, e a transpiração foliar das plantas que receberam o microgeo foi menor, logo, a planta conseguiu ser mais eficiente com o uso do microgeo.

Assimilação de CO₂ (A)

A assimilação de CO₂, também conhecida como fixação de carbono, é um processo fundamental na fotossíntese, o qual as plantas e outros organismos autotróficos utilizam para incorporar o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera em moléculas orgânicas, principalmente glicose e outros açúcares. Esse processo é essencial para a produção de biomassa e o armazenamento de energia nas células dos seres autotróficos, como plantas, algas e algumas bactérias.

A fotossíntese ocorre nas células das folhas (ou em outros órgãos verdes) e envolve várias etapas. A assimilação de CO₂ é uma das principais etapas, na qual o CO₂ atmosférico é incorporado em uma molécula orgânica chamada ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) com a ajuda da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO) (KHAN ACADEMY, S.D.). Esse processo gera compostos intermediários que

eventualmente são convertidos em açúcares, como glicose, através de uma série de reações bioquímicas.

A energia para a assimilação de CO₂ na fotossíntese é fornecida pela luz solar, que é absorvida pelas moléculas de clorofila nas células vegetais. Essa energia é usada para quebrar as ligações químicas no CO₂ e nas moléculas de água (H₂O), liberando oxigênio (O₂) como subproduto.

A glicose e outros açúcares produzidos durante a fotossíntese são a principal fonte de energia para as plantas e muitos outros seres vivos, incluindo os seres humanos, que dependem indiretamente da fotossíntese para sua nutrição. Além disso, a assimilação de CO₂ desempenha um papel crucial na regulação do nível de dióxido de carbono na atmosfera e na redução do aquecimento global, pois as plantas removem CO₂ da atmosfera e o armazenam na forma de biomassa.

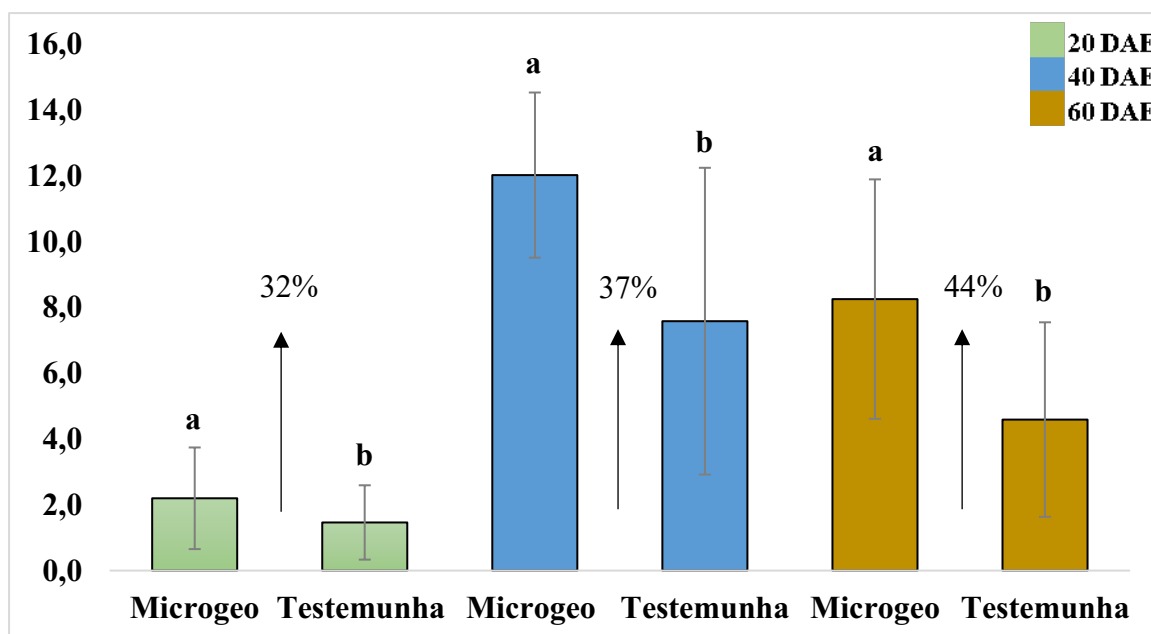


Figura 4. Assimilação de CO₂ (A) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

No experimento, as plantas que receberam o tratamento com microgeo tiveram maior assimilação de CO₂ em todos os períodos, em especial com 40 DAE (Figura 4). O que mostra a maior capacidade que essas plantas tiveram em produzir glicose e outros açúcares durante a fotossíntese, cujos são a principal fonte de energia para a planta.

Consumo de CO₂ (ΔC)

O consumo de CO₂ pela fotossíntese refere-se à remoção de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera por plantas, algas e algumas bactérias durante o processo de fotossíntese. Nesse contexto, o CO₂ atmosférico é utilizado como matéria-prima para a produção de alimentos e biomassa pelas plantas.

Na fotossíntese, a luz solar é absorvida pelas células vegetais, permitindo que as plantas convertam o CO₂ e a água em açúcares, como a glicose, e oxigênio (O₂) como subproduto. A incorporação do carbono do CO₂ na matéria orgânica é fundamental para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Além disso, a fotossíntese é um processo crucial para a regulação dos níveis de CO₂ na atmosfera.

O "CO₂ intercelular" refere-se à concentração de dióxido de carbono (CO₂) presente entre as células de um tecido vegetal, em oposição à concentração de CO₂ na atmosfera ou nos espaços subestomáticos dentro das folhas das plantas (Taiz; Zeiger, 2013). É uma medida da quantidade de CO₂ disponível para as células vegetais para fins de fotossíntese e outros processos metabólicos.

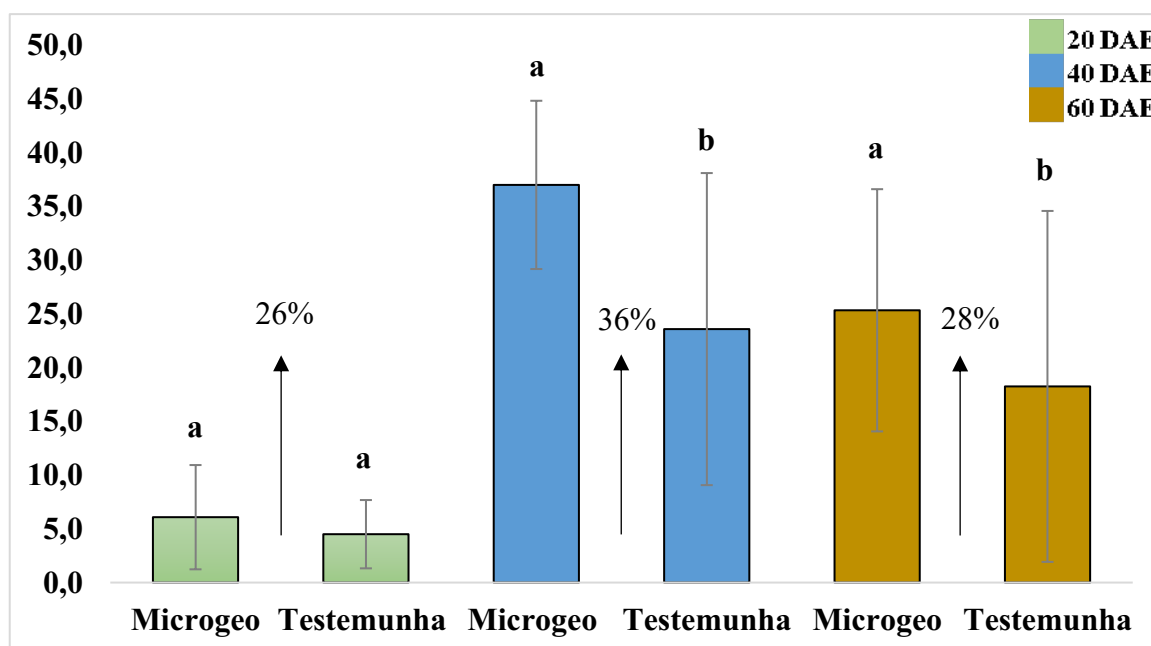


Figura 5. Consumo de CO₂ (ΔC) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

As plantas com 40 e 60 DAE que receberam o tratamento com o adubo biológico microgeo apresentaram maior consumo de CO₂, o que leva a crer que essas plantas possuíam maior biomassa, sendo essa a razão pelo maior consumo de CO₂. Com 20 DAE não houve alterações estatísticas (Figura 5).

CO₂ subestomático (Ci)

O CO₂ intercelular desempenha um papel importante na fotossíntese, pois é uma das matérias-primas necessárias para esse processo. Durante a fotossíntese, as células das plantas capturam CO₂ da atmosfera e o incorporam em moléculas orgânicas, como a glicose, usando a energia da luz solar.

A regulação da concentração de CO₂ intercelular é um aspecto crítico do funcionamento das plantas. Os estômatos controlam a troca de gases entre as plantas e a atmosfera, influenciando a concentração de CO₂ intercelular. Quando os estômatos estão abertos, o CO₂ pode entrar nas células das plantas para a fotossíntese, mas também há uma perda de água através da transpiração. Portanto, as plantas ajustam a abertura dos estômatos para equilibrar a absorção de CO₂ com a conservação de água (Taiz; Zeiger, 2013).

Sendo assim, o monitoramento e o entendimento da concentração de CO₂ intercelular são importantes em estudos relacionados à fisiologia das plantas e ao crescimento das culturas, pois podem influenciar a eficiência da fotossíntese e, por sua vez, a produtividade das plantas.

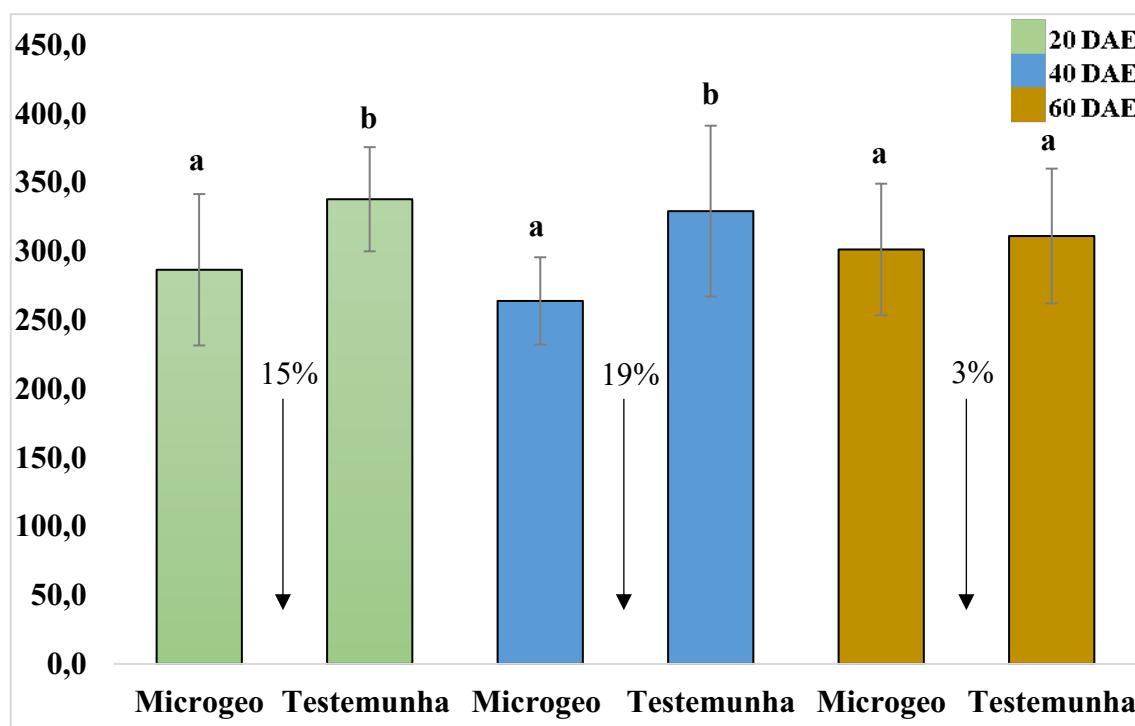


Figura 6. CO₂ subestomático (Ci) em mmol CO₂ mol⁻¹ ar da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

Como resultado dessa avaliação, as plantas que receberam o microgeo apresentaram menores quantidades de CO₂ subestomático, em especial com 20 e 40

DAE, obtendo uma diferença de até 19% quando comparada com a testemunha. Sendo assim, esses resultados foram favoráveis, pois indica que as plantas que receberam o adubo biológico estão utilizando mais CO_2 subestomático para a realização da fotossíntese.

Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente na Superfície Foliar (Qleaf)

A Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente na Superfície Foliar refere-se à quantidade de luz da faixa de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) que atinge a superfície das folhas de uma planta em um determinado período de tempo. Essa radiação é essencial para o funcionamento da fotossíntese, uma vez que fornece a energia luminosa necessária para impulsionar a reação química que converte CO_2 em carboidratos (ANDRADE; MOURA; SANTOS; CARNEIRO; SILVA JUNIOR, 2014).

A quantidade e a qualidade da RFA incidente nas folhas podem variar de acordo com a intensidade da luz solar, a posição da planta em relação ao sol e a presença de obstáculos que possam bloquear ou difundir a luz. Os agricultores e cientistas muitas vezes monitoram a RFA incidente nas folhas para entender como as plantas respondem à luz e como otimizar o crescimento e a produtividade das culturas em ambientes diferentes.

Em resumo, a RFA incidente na superfície foliar é a luz na faixa de espectro visível que as plantas usam para realizar a fotossíntese e produzir energia e biomassa. É uma parte crítica do processo de vida das plantas.

Nesse estudo, as plantas que receberam a biotecnologia microgeo apresentaram resultados menores de Qleaf quando comparado com as testemunhas, apresentando uma diferença de 26% com 20 e 40 DAE (Figura 7). Logo, as plantas que foram adubadas com o microgeo se mostraram mais ativas metabolicamente, pois com uma faixa menor de radiação a planta já consegue realizar a fotossíntese e produzir energia e biomassa.

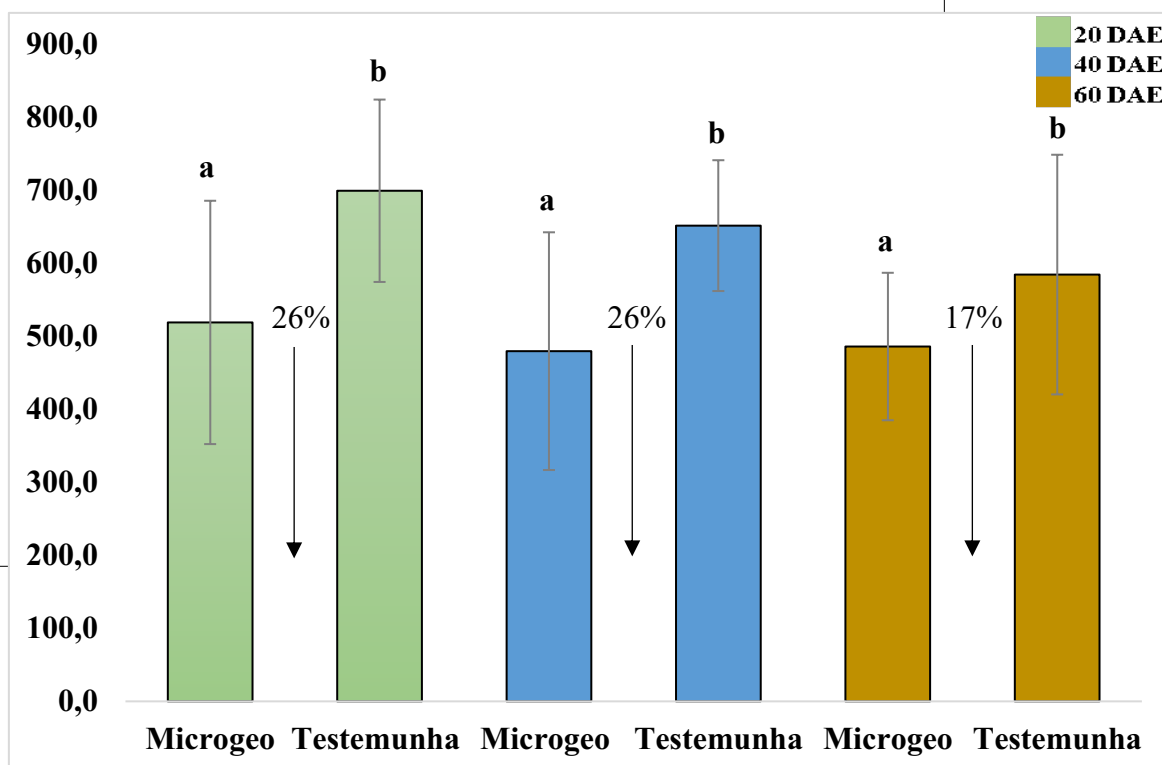


Figura 7. Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente na Superfície Foliar (Qleaf) em $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

Eficiência da Utilização da Água (A/E)

A Eficiência no Uso da Água (EUA), também conhecida como "Razão de Assimilação de CO₂ para Transpiração" ou "Eficácia da Utilização da Água," é uma medida que relaciona a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) assimilada pelas plantas durante a fotossíntese com a quantidade de água perdida por transpiração foliar. Ela é frequentemente expressa como uma relação, indicando quanto CO₂ foi fixado em relação à quantidade de água perdida. A fórmula geral para calcular a EUA é a seguinte: $EUA = \text{Assimilação de CO}_2 / \text{Transpiração de Água}$ (Taiz; Zeiger, 2013).

Essa relação é uma medida da eficiência com que uma planta está usando a água disponível para realizar a fotossíntese. Uma EUA alta indica que a planta está produzindo uma quantidade significativa de biomassa (ou seja, crescimento) em relação à quantidade de água perdida por transpiração, o que é considerado mais eficiente. Por outro lado, uma EUA baixa sugere que a planta está perdendo uma quantidade substancial de água em relação à quantidade de CO₂ que está assimilando, o que pode ser menos eficiente em termos de uso de recursos hídricos.

A EUA é uma característica importante para plantas que crescem em áreas com recursos hídricos limitados, como regiões áridas e semiáridas, pois plantas mais eficientes no uso da água podem sobreviver e prosperar em condições de seca moderada.

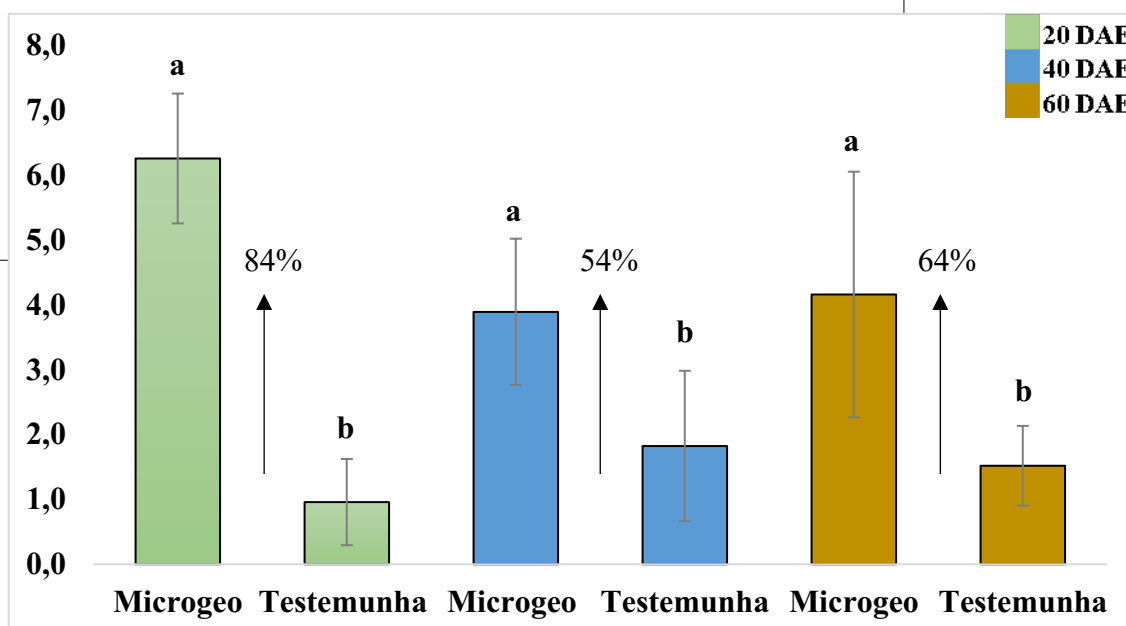


Figura 8. Eficiência da Utilização da Água (A/E) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

No experimento, as plantas que receberam o tratamento com microgeo obtiveram elevada eficiência na utilização da água, e quando comparada com as testemunhas, chegou a ocorrer uma diferença da EUA de 84% com 20 DAE (Figura 8). Dessa forma, a eficiência no uso da água revelou resultados excelentes com o uso do microgeo, pois as plantas de algodão demonstraram uma notável capacidade de produzir biomassa e realizar a fotossíntese de forma altamente eficiente, minimizando a perda de água por transpiração foliar, e isso é crucial em ambientes com recursos hídricos limitados, demonstrando uma adaptação incrível pelo uso da biotecnologia microgeo.

Eficiência da Carboxilação da Rubisco (A/ci)

A Eficiência da Carboxilação da Rubisco é uma medida que relaciona a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) assimilada pela enzima RuBisCO (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) durante o processo de fotossíntese com a quantidade de CO₂ disponível no ambiente intercelular das plantas. Essa eficiência está diretamente relacionada ao desempenho da RuBisCO, uma enzima chave na fixação do carbono na fotossíntese (MENDES; MARENCO; NASCIMENTO, 2017).

A eficiência da carboxilação da RuBisCO é expressa como uma relação ou razão, geralmente em termos de CO₂ assimilado em relação à concentração de CO₂ no ambiente intercelular. A fórmula geral para calcular essa eficiência pode ser representada da seguinte forma: Eficiência da Carboxilação da RuBisCO = Assimilação de CO₂/Concentração de CO₂ Intercelular.

Uma alta eficiência da carboxilação da RuBisCO indica que a enzima RuBisCO está eficazmente capturando e incorporando CO₂ disponível na fotossíntese, mesmo quando a concentração de CO₂ no ambiente intercelular é relativamente baixa. Isso é importante porque a fotossíntese é um processo dependente de CO₂, e uma alta eficiência da RuBisCO contribui para uma melhor utilização do CO₂ disponível para a produção de biomassa.

No entanto, a eficiência da carboxilação da RuBisCO pode ser afetada por condições ambientais, como a disponibilidade de CO₂, temperatura e umidade. Variações nessa eficiência podem impactar a capacidade das plantas de realizar a fotossíntese de maneira eficiente e, conseqüentemente, seu crescimento e desenvolvimento.

Essa medida é frequentemente estudada em contextos de pesquisa agrícola, fisiologia vegetal e biologia molecular para entender como as plantas respondem a diferentes condições ambientais e como podem ser melhoradas em termos de eficiência de carboxilação da RuBisCO.

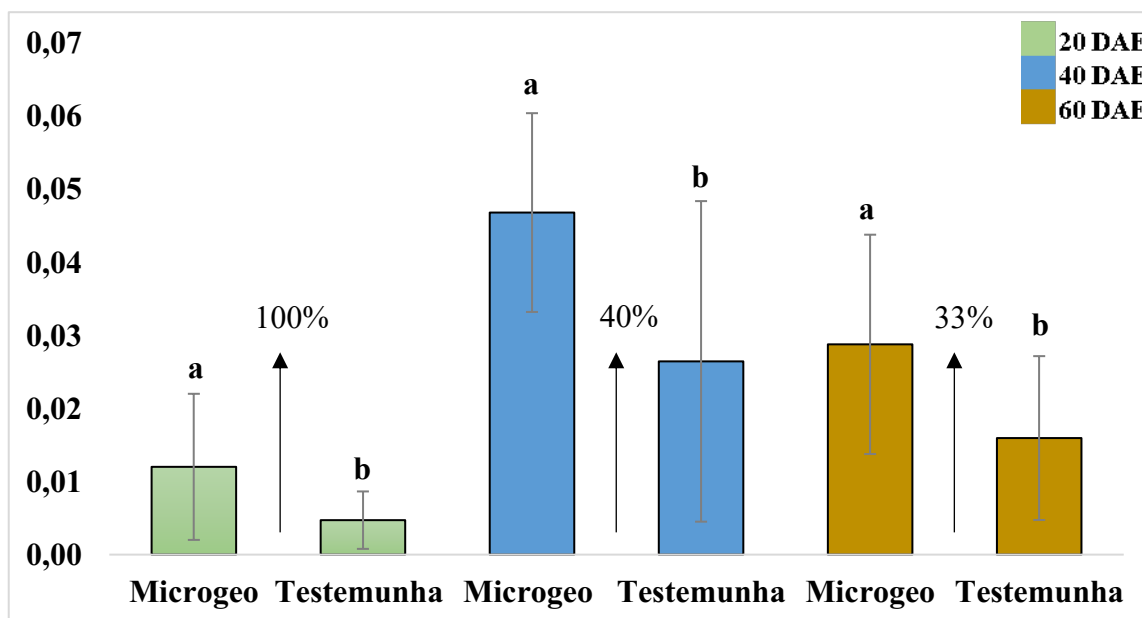


Figura 9. Eficiência da Carboxilação da Rubisco (A/ci) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol CO}_2^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

No presente experimento, a maior eficiência da carboxilação da rubisco ocorreu pelas plantas que receberam a biotecnologia microgeo, chegando a ocorrer 100% de diferença com a testemunha em 20 DAE (Figura 9). Sendo assim, destacou-se a capacidade das plantas que receberam o microgeo em utilizar com eficácia o dióxido de carbono (CO₂) disponível, independentemente da concentração de CO₂ intercelular, sendo essa eficiência fundamental para o crescimento e a produção de biomassa.

Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese (A/Qleaf)

A Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese é uma medida que relaciona a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) assimilada pelas plantas durante o processo de fotossíntese com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) que incide na superfície foliar. Essa eficiência é uma medida da capacidade das plantas de usar eficazmente a luz solar disponível para a produção de matéria orgânica (principalmente glicose) por meio da fotossíntese (SOUZA, 2019).

A eficiência fotoquímica da fotossíntese é expressa como uma relação ou razão, geralmente em termos de CO₂ assimilado em relação à quantidade de RFA incidente na superfície foliar. A fórmula geral para calcular essa eficiência pode ser representada da seguinte forma: Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese = Assimilação de CO₂ / Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente.

Uma alta eficiência fotoquímica indica que as plantas estão convertendo eficientemente a energia da luz solar em energia química (na forma de compostos orgânicos ricos em energia) por meio da fotossíntese, mesmo quando a quantidade de luz solar disponível é relativamente baixa. Isso é fundamental para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, uma vez que a fotossíntese é o processo que fornece a maior parte dos nutrientes e da energia para as plantas.

A eficiência fotoquímica da fotossíntese pode variar de acordo com as condições ambientais, como a intensidade da luz solar, a duração da exposição à luz e a disponibilidade de CO₂. Essa medida é importante em pesquisas relacionadas à agricultura, ecologia e fisiologia vegetal, pois ajuda a entender como as plantas respondem às condições ambientais e como podem ser otimizadas em termos de eficiência de uso da luz solar para fins de crescimento e produção de alimentos.

No presente estudo, foi observado a maior eficiência fotoquímica da fotossíntese pelas plantas que receberam a biotecnologia microgeo, ocorrendo diferença de 60% com

20 e 40 DAE, e de 50% com 60 DAE quando comparada com as testemunhas (Figura 10).

Como a maior eficiência fotoquímica das plantas gera maior necessidade de carbono absorvido para dar continuidade aos processos da fotossíntese, isso justifica o maior consumo de CO₂ pelas plantas com 40 DAE mostrado anteriormente (Figura 5), onde a eficiência fotoquímica da fotossíntese foi maior.

Dessa forma, a Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese ressaltou a habilidade das plantas que receberam o microgeo de converter com eficácia a luz solar em energia química por meio da fotossíntese, especificamente na faixa de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA). E isso é vital para a sobrevivência das plantas e sua contribuição para altas produtividades.

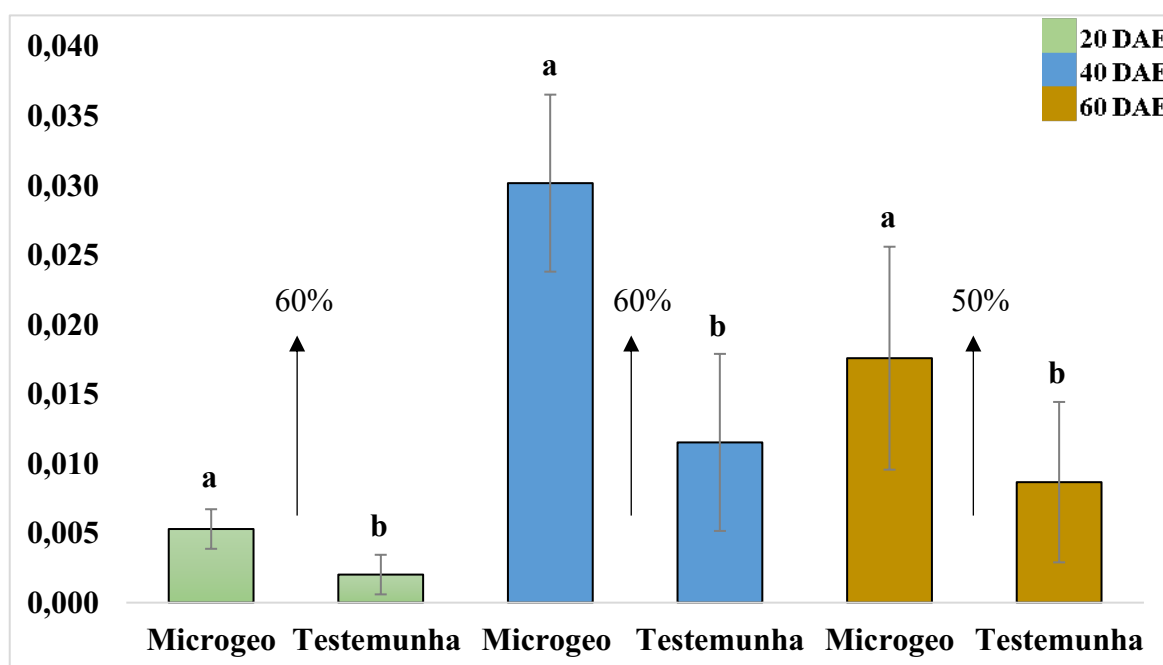


Figura 10. Eficiência Fotoquímica da Fotossíntese (A/Q_{leaf}) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ da cultivar FM985GLTP com 20, 40 e 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

Enzima Beta-glicosidase

A análise da enzima beta-glicosidase não houve alterações significativas até os 60 dias após a emergência da cultura (Figura 11).

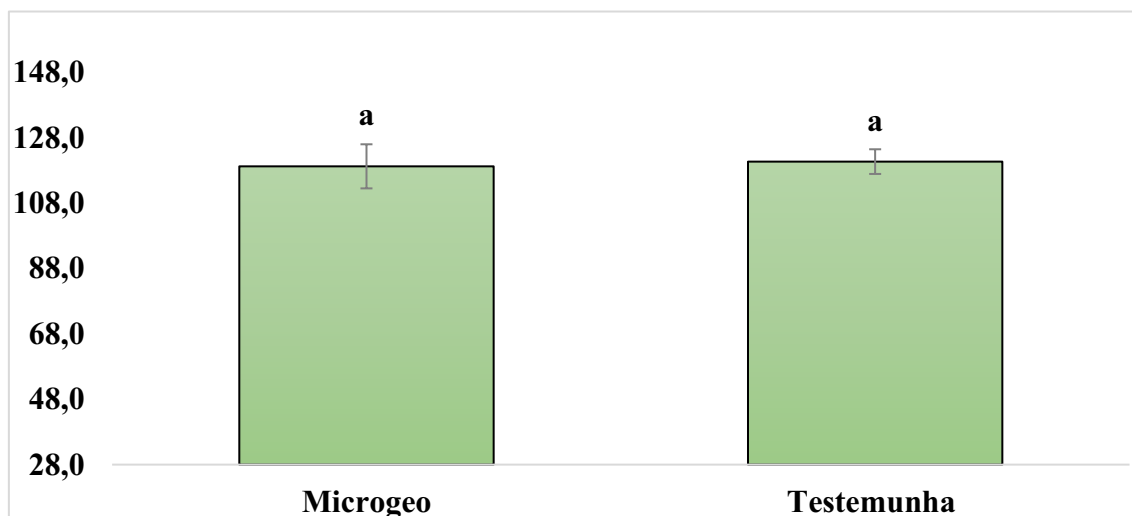


Figura 11. Enzima Beta-glicosidase em ug PNP g⁻¹ solo da cultivar FM985GLTP com 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

Carbono da biomassa microbiana (CBM) ug C g⁻¹ solo

Na análise do carbono da biomassa microbiana não houve alterações significativas até os 60 dias após a emergência da cultura (Figura 12).

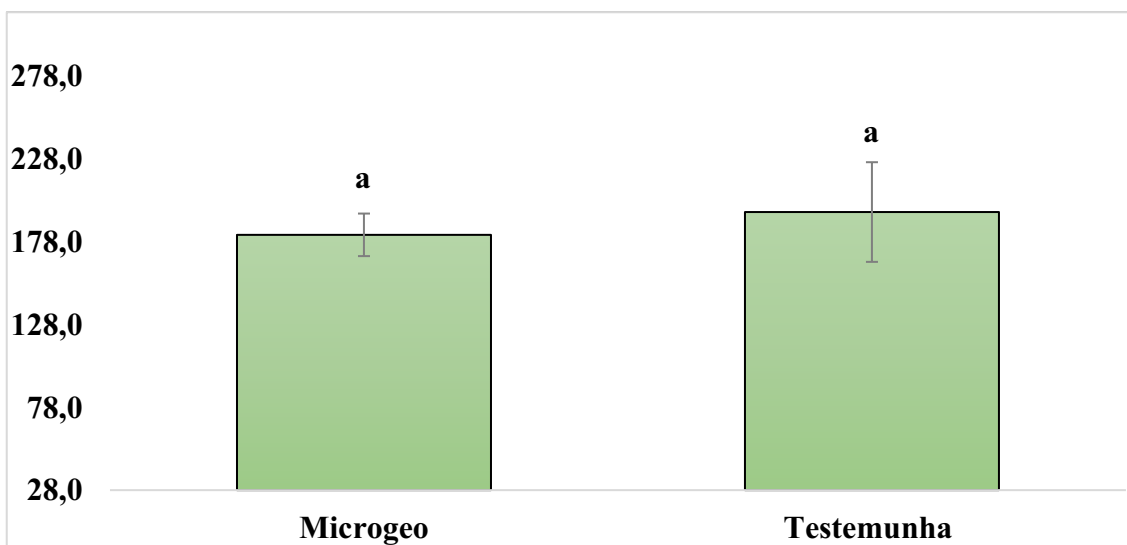


Figura 12. Carbono da biomassa microbiana (CBM) em ug C g⁻¹ solo da cultivar FM985GLTP com 60 DAE. Fonte: Paiva et al. (2024).

4 CONCLUSÃO

As análises demonstraram que o uso do adubo biológico Microgeo potencializa a eficiência dos processos fotossintéticos e o aproveitamento dos recursos naturais pelas plantas de algodão, mesmo em condições de recursos hídricos limitados. Verificou-se uma excepcional eficiência no uso da água, na carboxilação pela RuBisCO e na conversão da luz solar, permitindo um notável desenvolvimento da biomassa. Tais resultados evidenciam que a aplicação deste adubo não só otimiza a fisiologia vegetal, como também oferece bases promissoras para práticas agrícolas sustentáveis e para a mitigação dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAPA (org.). **Dados**. Disponível em: <https://abrapa.com.br/dados/>. Acesso em: 08 set. 2023.

ABRAPA (org.). **Abrapa elevou a estimativa de produção da safra de algodão 2022/2023**. 2023. Disponível em: <https://abrapa.com.br/2023/10/04/abrapa-elevou-a-estimativa-de-producao-da-safra-de-algodao-2022-2023/#>. Acesso em: 03 maio 2024.

ANDRADE, Antonio Marcos Delfino de; MOURA, Marcos Antonio Lima; SANTOS, Aurilene Barros dos; CARNEIRO, Rayonil Gomes; SILVA JUNIOR, Rosiberto Salustiano da. Radiação Fotossinteticamente Ativa incidente e refletida acima e abaixo do dossel de floresta de Mata Atlântica em Coruripe, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 68-79, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862014000100007>.

BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO. Planaltina, Df: Embrapa, 2007.

HENSCHER, Juliane Maciel; BATISTA, Diego Silva. **Tutorial de operação do IRGA (LCpro-SD, @ADC BioScientific)**. Bananeiras, Pb: Universidade Federal da Paraíba, 2021.

CADERNO SETORIAL ETENE. [S.L.]: Etene, 2023. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1748/1/2023_CDS_284.pdf. Acesso em: 01 set. 2023.

HENSCHER, Juliane Maciel; BATISTA, Diego Silva. **Tutorial de operação do IRGA (LCpro-SD, @ADC BioScientific)**. Bananeiras, Pb: Universidade Federal da Paraíba, 2021.

KAISER, E.; GALVIS, V. C.; ARMBRUSTER, U. **Efficient photosynthesis in dynamic light environments: A chloroplast's perspective**. *Biochemical Journal*, v. 476, n. 19, p. 2725–2741, 2019.

KHAN ACADEMY. **Fotorrespiração**. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/photorespiration--c3-c4-cam-plants/a/c3-c4-cam-plants>. Acesso em: 02 set. 2023.

MENDES, Keila Rêgo; MARENCO, Ricardo Antonio; NASCIMENTO, Helena Cristina Santos. VELOCIDADE DE CARBOXILAÇÃO DA RUBISCO E TRANSPORTE DE ELÉTRONS EM ESPÉCIES ARBÓREAS EM RESPOSTA A FATORES DO AMBIENTE NA AMAZÔNIA CENTRAL. **Ciência Florestal**, [S.L.],

v. 27, n. 3, p. 947-959, 31 ago. 2017. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509828666>.

MICROGEO. RECOMENDAÇÕES E RESULTADOS CIENTÍFICOS. Disponível em: <http://www.microgeo.com.br/pesquisa/>. Acesso em: 02 set. 2023.

PEREZ, Kátia Sueli Sivek; RAMOS, Maria Lucrécia Gerosa; MCMANUS, Concepta. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 39, n. 6, p. 567-573, jun. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2004000600008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/vW59wQHxz3Ysz9mHB3ZtZGt/#ModalTutors>. Acesso em: 01 set. 2023.

REIS JUNIOR, Fábio Bueno dos; MENDES, Iêda de Carvalho. Biomassa Microbiana Do Solo. **Embrapa**, Planaltina, Df, v. 01, n. 1, p. 01-38, ago. 2007.

SANTOS, Anna Luiza Farias dos. **EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E PRODUTIVA DE MILHO SAFRINHA EM FUNÇÃO DE ÉPOCAS DE SEMEADURA E POPULAÇÕES DE PLANTAS.** 2017. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-Ms, 2017

SEVERINO, Liv Soares *et al.* **SÉRIE DESAFIOS DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO (NT3).** [S.I.]: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1109655/1/SerieDesafiosAgronegocioBrasileiroNT3Algodao.pdf>. Acesso em: 07 set. 2023.

SOUZA, Icaro Leite. **EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA E TROCAS GASOSAS: ASSOCIAÇÃO COM O PERÍODO VEGETATIVO E PRODUTIVO EM PLANTAS DE DUAS CULTIVARES DE MAMOEIRO.** 2019. 39 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biologia Vegetal, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Es, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 5ª edição. Porto Alegre: Artmed Editora, 2013.

TRIBUZY, Edgard Siza. **VARIAÇÕES DA TEMPERATURA FOLIAR DO DOSSEL E O SEU EFEITO NA TAXA ASSIMILATÓRIA DE CO₂ NA AMAZÔNIA CENTRAL.** 2005. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível

em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-15072005-144011/publico/EdgardTribuzy.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2024.

VIDAL NETO, Francisco das Chagas; FREIRE, Eleusio Curvelo. **Melhoramento genético do algodoeiro**. [S.I.]: Embrapa, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/100490/1/CLV13032.pdf>. Acesso em: 08 set. 2023.

WADDLE, B.A. Crop growing practices. In: KOHEL, R.J.; LEWIS, C.F. Cotton. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p.233-263, cap. 8.