

O algodoeiro e os estresses abióticos

Temperatura, luz, água
e nutrientes



INSTITUTO MATO-GROSSENSE DO ALGODÃO

Instituto Mato-Grossense do Algodão (IMAmt)

Av. Rubens de Mendonça, 157. Sala 101.

Ed. Mestre Ignácio. Cuiabá (MT)

CEP 78.008-000

Fone: (65) 3321.6482

ima@imamt.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Instituto Mato-Grossense do Algodão - IMAmt

O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes / editor técnico: Fábio Rafael Echer - Cuiabá (MT), 2014.

123 p.: il.; 14,8 x 21 cm

ISBN: 978-85-66457-03-2

1. Tecnologia (Ciências Aplicadas). 2. Agricultura.

I. Título.

CDD: 600, 630

CDU: 001, 63

BOLETIM DE P&D
Número 1 | Junho de 2014

O algodoeiro e os estresses abióticos

Temperatura, luz, água e nutrientes

Fábio Rafael Echer
editor técnico

DIRETORIA DO IMA-MT
Gestão 2013-2014

Presidente

Milton Garbúgio

Vice Presidente

Gustavo Vígano Piccoli

1º Tesoureiro

Guilherme Mognon Scheffer

2º Tesoureiro

Alexandre De Marco

1º Secretário

Paulo Sérgio de Aguiar

2º Secretário

Pedro Sérgio Almeida Prado de Castro Valente

Conselho Fiscal Titular

Celso Griesang, Otavio Palmeira dos Santos, Sérgio Introvini

Conselho Fiscal Suplente

Rafael Bortoli, João André Lopes Guerreiro, Conselheiro Fiscal Suplente Ernesto Martelli

“Mas o algodoeiro é uma planta exigente. Não é fácil fazê-lo medrar onde ele não quer. É como uma criança impertinente e muito despótica. É preciso tratá-la como um bebê de peito. Exige ele como adubo cinza de madeira; precisa como os vegetais palustres, de grande quantidade de água, além de ser constantemente revirado, despojado de parasitas e bem cuidado. A colheita demora às vezes mais de um quarto de ano, pois as cápsulas das sementes amadurecem devagar, uma após a outra. É penoso cuidar de um algodão. O sol dardeja raios incendiários. Água? Nenhuma. Sombra? Também nenhuma.”

Antônio Zischka

“A guerra secreta pelo algodão” (1936)
Editora Globo. p.85-86.

AUTORES

Dr. Ciro Antonio Rosolem

Professor Titular, Departamento de Agricultura, FCA/Unesp
Botucatu-SP | E-mail: rosolem@fca.unesp.br

Dr. Eduardo M. Kawakami

Pesquisador, Melhoramento Genético de Algodão, Fundação MT
Rondonópolis- MT | Email: eduardokawakami@fundacaomt.com.br

Dr. Ederaldo José Chiavegato

Professor do Departamento de Produção Vegetal - ESALQ/USP
Piracicaba-SP | E-mail: ejchiave.esalq@usp.br

Dr. Fábio Rafael Echer

Pesquisador, Departamento de Fisiologia, Instituto Mato-grossense do Algodão
Primavera do Leste-MT | E-mail: fabioecher@imamt.com.br

Dr. Giovani Greigh de Brito

Pesquisador, Embrapa Clima Temperado
Pelotas-RS | E-mail: giovani.brito@embrapa.br

Eng. Agro. Henrique Da Ros Carvalho

Mestrando na Texas A&M University
College Station - Texas - EUA | E-mail: henrique.carvalho05@tamu.edu

Dr. John L. Snider

Professor Assistente, Universidade da Geórgia
Tifton-GA, EUA | Email: jsnider@uga.edu

Dr. Júlio César Bogiani

Pesquisador, Embrapa Algodão
Luís Eduardo Magalhães-BA | E-mail: julio.bogiani@embrapa.br

Dr. Marcos Silveira Bernardes

Professor do Departamento de Produção Vegetal - ESALQ/USP
Piracicaba-SP | E-mail: marcosbernardes@usp.br

Dr. Stephen Yeates

Pesquisador, CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research
Ayr, Austrália | E-mail: stephen.yeates@csiro.au

SUMÁRIO

Apresentação

O algodoeiro e os estresses abióticos9

Capítulo 1. Estresse térmico

Efeito da temperatura no desenvolvimento do algodoeiro13

Capítulo 2. Estresse luminoso

Efeitos do estresse luminoso na fisiologia do algodoeiro31

Estratégias para melhorar o aproveitamento da luminosidade
na cultura do algodão43

Capítulo 3. Estresse hídrico

Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro63

Parâmetros fisiológicos para seleção de cultivares tolerantes
ao déficit hídrico79

Capítulo 4. Estresse nutricional

Nutrição e estresses nutricionais em algodoeiro103

O algodoeiro e os estresses abióticos

Fábio R. Echer

Instituto Mato-grossense do Algodão

Há indícios de que o algodoeiro, pertencente à tribo *Gossypieae*, tenha surgido 20 milhões de anos atrás, enquanto que o gênero *Gossypium* surgiu há pelo menos 12,5 milhões de anos (Wendel et al., 2010), em três centros primários de origem: região de Kimberley, na Austrália; penínsulas Somália e Arábica, na África e na Ásia, respectivamente; e nas áreas Centro-Ocidental e Sul do México. Atualmente, o gênero *Gossypium* inclui 49 espécies conhecidas, mas esse número pode ser subestimado, devido à falta de informações, principalmente das espécies que ocorrem na África e na Arábia.

A maior parte dessas espécies é oriunda de uma faixa geográfica que compreende regiões tropicais e subtropicais de baixa latitude, e tendem a ocorrer em ambientes relativamente áridos e, eventualmente, extremamente áridos. O clima nessas áreas é desértico (*BW*), com temperaturas médias anuais superiores a 18°C (h) (*BWh* - Köppen). Essa condição climática, aliada às características do solo, exerce um controle sobre a vegetação de uma determinada região, e, por sua vez, as características genéticas de cada espécie conferem sua adaptação ao ambiente (Fryxell, 1986).

As variáveis climáticas — tais como temperatura, precipitação pluviométrica, ventos e quantidade e qualidade da luminosidade que incidem em um local — ocorrem de maneira combinada na natureza. Apesar do estudo isolado de cada uma dessas variáveis muitas vezes não ser a melhor forma de analisar o efeito sobre o crescimento e desenvolvimento do algodoeiro, conhecer o efeito fisiológico e bioquímico de cada fator sobre a planta permite elaborar estratégias de convivência da espécie com esses fatores abióticos.

Entre os fatores climáticos, a temperatura desempenha papel de destaque sobre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do algodoeiro (Gipson, 1986). A temperatura média em que o algodoeiro apresenta melhor

crescimento e desenvolvimento é de $28^{\circ}\text{C}\pm 3$ (Burke, 1990); entretanto, há variação entre os genótipos (Liu et al., 2006), o que é uma característica importante nos programas de melhoramento. Além da temperatura diurna, a temperatura noturna também desempenha um papel importante no desenvolvimento do algodoeiro, pois, se alta, tende a aumentar a respiração das plantas e o consumo de carboidratos (Loka e Oosterhuis, 2010), diminuindo a viabilidade do grão de pólen, o que, por fim, ocasiona a queda da estrutura reprodutiva, sobretudo quando a alta temperatura noturna ocorre nos períodos de botão floral e florescimento (Echer et al., 2014). As temperaturas noturnas influenciam também a qualidade da fibra, que apresenta resposta linear do micronaire com o aumento da temperatura de 5°C até 25°C . Entretanto, o máximo comprimento da fibra de diferentes variedades ocorre sob temperaturas noturnas de $15\text{-}20^{\circ}\text{C}$ (Gipson e Johan, 1968).

O déficit hídrico é o fator climático que mais limita a produtividade agrícola mundial, e, onde existe limitação hídrica, o acúmulo de biomassa é influenciado linearmente pela transpiração acumulada (Hay e Porter, 2006). A produtividade das culturas sob limitação hídrica pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Y = Q_w \times A \times \varepsilon_w \times H$$

onde:

Q_w é a quantidade total de água potencialmente disponível para a cultura ao longo do ciclo de cultivo,

A é a fração de Q_w que é absorvida pela cultura,

$Q_w A$ é a quantidade total de água transpirada pela cultura,

ε_w é a eficiência fotossintética da cultura em termos de produção de biomassa seca total produzida por unidade de água transpirada (uso eficiente da água),

H é o índice de colheita da cultura (i.e. produtividade de algodão em caroço — em kg ha^{-1} — dividida pela produção de biomassa total — em kg ha^{-1}).

Assim, para uma determinada quantidade de água transpirada pelo dossel vegetal, a produtividade colhida pode depender da eficiência do uso da água em manter o aparato fotossintético e da partição de assimilados, isto é, da transferência de carboidratos para os capulhos.

No Estado de Mato Grosso, a grande concentração de chuvas nos meses de janeiro e fevereiro diminui consideravelmente a quantidade e a qualidade da luz disponível às plantas. Para o algodoeiro, principalmente o semeado em dezembro (ambiente safra), isso pode representar um significativo aumento no aborto de estruturas frutíferas, com o conseqüente alongamento de ciclo, perda de qualidade e produtividade. O resultado final, mesmo que a produtividade seja recuperada, será o aumento no custo de produção. Além da luz disponível, outro fator que altera a resposta fotossintética da planta é a idade da folha (Echer e Rosolem, 2014), cuja longevidade é geneticamente programada (Taiz e Zeiger, 2010).

Os nutrientes minerais desempenham diversas funções nas plantas, por exemplo, mantêm o balanço de cargas, transporte de elétrons, componen-

tes estruturais, manutenção do turgor e ativação enzimática. Os efeitos da deficiência de nutrientes vão do imediato cessamento do crescimento radicular, rompimento das membranas e paredes celulares às mudanças no pH do citosol e diminuição no transporte de carboidratos. Cada um desses efeitos resulta em estresse oxidativo (fotoinibição e foto-oxidação), que gera a destruição dos cloroplastos, sintomaticamente identificada como clorose e necrose (Hodges e Constable, 2010). Conhecer o efeito metabólico causado pelo excesso ou pela deficiência de nutrientes no algodoeiro sobre o crescimento, desenvolvimento e componentes de produção é importante para reduzir as perdas em produtividade causadas pelo estresse nutricional.

Direta ou indiretamente, os estresses hídrico, térmico, luminoso e nutricional reduzem a taxa de acúmulo diário de matéria seca, cujo potencial teórico do algodoeiro chega a $30 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Mauney, 1986), o que representaria uma produtividade de fibra em torno de 3.000 kg ha^{-1} (Baker et al., 1972). Atualmente, as produtividades obtidas nos principais países produtores de algodão estão aquém do potencial produtivo e são de 2.138 kg ha^{-1} de algodão em fibra na Austrália, 1.464 kg ha^{-1} no Brasil, 1.407 kg ha^{-1} na China, 971 kg ha^{-1} nos Estados Unidos, 740 kg ha^{-1} no Paquistão e de 470 kg ha^{-1} na Índia (Abrapa, 2013).

Referências Bibliográficas

ABRAPA. Associação Brasileira dos Produtores de Algodão. Estatísticas. Disponível em: <http://www.abrapa.com.br/estatisticas/Paginas/mapa-mundi.aspx>. Acesso em: 04/12/13.

BAKER, D. N., J. D. HESKETH, AND W. G. DUNCAN. The simulation of growth and yield in cotton. I. Gross photosynthesis, respiration and growth. **Crop Sci.** 12:431-435.1972.

BURKE, J. J. Variation among species in the temperature dependence of the reappearance of variable fluorescence following illumination. **Plant physiology**, 93(2), 652-656. 1990.

ECHER, F. R.; OOSTERHUIS, D. M ; LOKA, D. ROSOLEM, C.A. High night temperatures during the floral bud and flowering stages increase the abscission of reproductive structures in cotton. **Journal of Agronomy and Crop Science**, V.200, n.3, p.191-198. 2014.

ECHER, F. R.; ROSOLEM, C. A. Physiological responses of cotton plants to light and leaf aging. **Biologia Plantarum**. 2014.

FRYXELL, P. A. Ecological Adaptations of Gossypium Species. In: MAUNEY, J. R.; STEWART, J. McD. (Eds). **Cotton physiology**. Memphis, Tennessee: The Cotton Foundation Publisher, p. 1-7. 1986.

GIPSON, J. R. Temperature Effects on Growth, Development and Fiber Properties. In: MAUNEY, J. R.; STEWART, J. McD. (Eds). **Cotton physiology**. Memphis, Tennessee: The Cotton Foundation Publisher, p. 47-56. 1986

GIPSON, J. R.; JOHAM, H. E. Influence of night temperature on growth and development of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). II. Fiber Properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, p. 296-298, 1968.

HAY, R.; PORTER, J. **The Physiology of Crop Yield**. Blackwell Publishing, Ames, IA, USA. 2006

HODGES, S. C.; CONSTABLE, G. Plant responses to mineral deficiencies and toxicities. In: **Physiology of cotton**. Springer Netherlands, 2010. p. 142-161.

LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M. Effect of high night temperatures on cotton respiration, ATP levels and carbohydrate content. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 68, p. 258-263, 2010.

LIU, Z.; YUAN, Y. L.; LIU, S. Q.; YU, X. N.; RAO, L. Q. (2006). Screening for high-temperature tolerant cotton cultivars by testing in vitro pollen germination, pollen tube growth and boll retention. **J Integrat Plant Biol** 48(6), 706–714.

MAUNEY, J. R.. Carbohydrate production and partitioning in the canopy. pp. 183-191. In: MAUNEY, J. R. and J.McD. Stewart (eds.). **Cotton Physiology**. Cotton Foundation, Memphis. 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.. **Plant physiology**. Sunderland, MA, Sinauer Associates. 5th ed. 2010. 782 p.

WENDEL, J. F.; BRUBAKER, C. L.; SEELANAN, T. The origin and evolution of *Gossypium*. In: STEWART, J.; OOSTERHUIS, D.; HEITHOLT, J. J.; MAUNEY, J. Editors. **Physiology of cotton**. New York. 2010. 563p.

CAPÍTULO 1

ESTRESSE TÉRMICO

Efeito da temperatura no desenvolvimento do algodoeiro

John L. Snider

Universidade da Geórgia-EUA

Eduardo M. Kawakami

Fundação MT

Dentre os fatores ambientais, a temperatura é um dos parâmetros que mais influenciam o desenvolvimento do algodoeiro. Exemplo claro disso é a utilização do monitoramento da fenologia da cultura por meio da somatória dos graus-dia ($[T \text{ máxima} + T \text{ mínima}/2] - 15$), em que temperaturas médias mais elevadas resultam no adiantamento do ciclo da cultura (Reddy et al., 1996). A temperatura ótima para o desenvolvimento do algodão está na faixa entre 20°C e 30°C; no entanto, é comum o algodoeiro ser cultivado em regiões com temperaturas abaixo de 15°C (ex. EUA - período de emergência) e acima de 40°C (ex. Índia). Compreender os efeitos do estresse térmico sobre as culturas é extremamente importante, devido às grandes variações de temperaturas, que podem ocorrer de um dia para o outro ou até entre períodos de um mesmo dia. Embora o algodoeiro seja considerado uma espécie que tem a capacidade de manter a temperatura da planta bem abaixo da temperatura ambiente, as temperaturas foliares podem variar substancialmente em escalas curtas de tempo. Por exemplo, Wise et al. (2004) observaram flutuações de até 10°C na temperatura foliar do algodão no intervalo de somente alguns segundos. É importante ressaltar que o desenvolvimento reprodutivo é possivelmente a fase mais sensível ao estresse térmico (Snider e Oosterhuis, 2012). Em um trabalho recente de Snider et al. (2011d), demonstrou-se que as estruturas reprodutivas (pistilo da flor) podem apresentar temperaturas mais quentes que a do ambiente, o que pode agravar os impactos negativos da ocorrência de temperaturas altas durante a fase de frutificação do algodoeiro.

Estima-se que as constantes variações climáticas ano após ano, somando-se ainda o aumento da temperatura, resultem em perdas significativas

na agricultura. Pesquisas recentes sobre mudança climática sugerem que, até o final do século 21, a temperatura média da superfície global vai aumentar de 2°C a 4°C (EPA, 2013). Atualmente, inúmeras pesquisas são realizadas para estudar o efeito de altas temperaturas nas culturas, levando em consideração o fato de que reduções substanciais na produtividade de inúmeras espécies vegetais, incluindo o algodoeiro, podem ocorrer mesmo com pequenos aumentos de temperatura no ambiente (Oosterhuis, 2002; Pettigrew, 2008). Contrariando sua história evolutiva, o algodão não apresenta máximo potencial produtivo em condições de altas temperaturas. Um dos principais motivos deste fato está relacionado à alta sensibilidade do algodoeiro na fase de desenvolvimento das flores, quando inúmeros processos, como o desenvolvimento do pólen e fertilização, são inibidos mesmo com aumentos moderados nas temperaturas ($> 32^{\circ}\text{C}$) (Reddy et al., 1996; Oosterhuis, 2002; Burke et al., 2004; Kakani et al., 2005; Oosterhuis e Snider, 2011; Snider et al., 2009, 2011a, 2011b, 2011c; Snider e Oosterhuis, 2012). Desta forma, mesmo pequenos aumentos de temperatura podem resultar em redução de produtividade por conta de limitações na quantidade de sementes produzidas, considerando que o sucesso da fertilização é um requisito básico para a produção de sementes e, com a quantidade de fibras por semente, é componente principal da produtividade do algodoeiro (Pettigrew, 2008).

É importante lembrar que, no Brasil, uma das grandes diferenças no sistema de cultivo, em comparação com outros países, é o ciclo de produção mais longo. Por exemplo, nos EUA, devido às estações climáticas serem bem definidas, o período de florescimento e frutificação é todo concentrado em um único mês (julho, no Delta do Mississippi), enquanto que, no Brasil, esse período varia entre 40 e 70 dias (meados de fevereiro ao final de abril, em Mato Grosso). Esse fator permite ao nosso algodão uma janela maior de oportunidade de compensação e recuperação de qualquer fator ambiental de estresse que possa ter ocorrido durante a fase de floração. Em se tratando de temperaturas elevadas durante a fase reprodutiva do algodão na safra 12/13, apenas na região de Sorriso-MT foram observados seis dias com ocorrência de temperaturas acima de 35°C (*figura 1*). Isso indica que, atualmente, estresse de altas temperaturas é algo regionalizado e esporádico, portanto, ainda não é possível afirmar que o estresse térmico cause perdas de produtividade de algodão no Brasil. Apesar de, nas nossas condições, o estresse térmico não ser um fator restritivo de alta importância, não há como prever que no futuro isso continue a sustentar-se ou que as temperaturas não ultrapassem os 35°C com maior frequência. Além disso, o efeito da temperatura na qualidade de fibra, principalmente no micronaire, é uma realidade para todas as nossas regiões produtoras. Portanto, é de extrema importância o entendimento deste processo para diminuição dos riscos de descontos no valor do produto final.

O déficit hídrico pode também ocorrer concomitantemente com eventos de altas temperaturas, dificultando a interpretação isolada do efeito de cada fator de estresse. Por exemplo, altas temperaturas podem aumentar a demanda evaporativa das plantas através do efeito sobre o déficit da pressão

de vapor, aumentando a taxa de evapotranspiração da cultura (Hall, 2001). Neste caso, se as reservas de água do solo são insuficientes para atender a demanda hídrica da planta, o potencial hídrico da cultura vai diminuir, podendo ocasionar total inibição dos processos fisiológicos fundamentais da planta (Krieg, 1986). Além disso, o estresse hídrico pode resultar no fechamento dos estômatos, limitando o resfriamento evaporativo da folha, o que pode induzir um estresse térmico no algodão, mesmo em condições ótimas de temperatura do ambiente. Embora muitas vezes a seca e a temperatura alta ocorram simultaneamente, com efeitos aditivos que são deletérios aos processos fisiológicos da planta, esta revisão discutirá somente estudos de estresse térmico em que o regime hídrico não foi um fator limitante. Desta forma, o objetivo da revisão é discutir os efeitos da temperatura sobre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, a produtividade e a qualidade da fibra do algodoeiro.

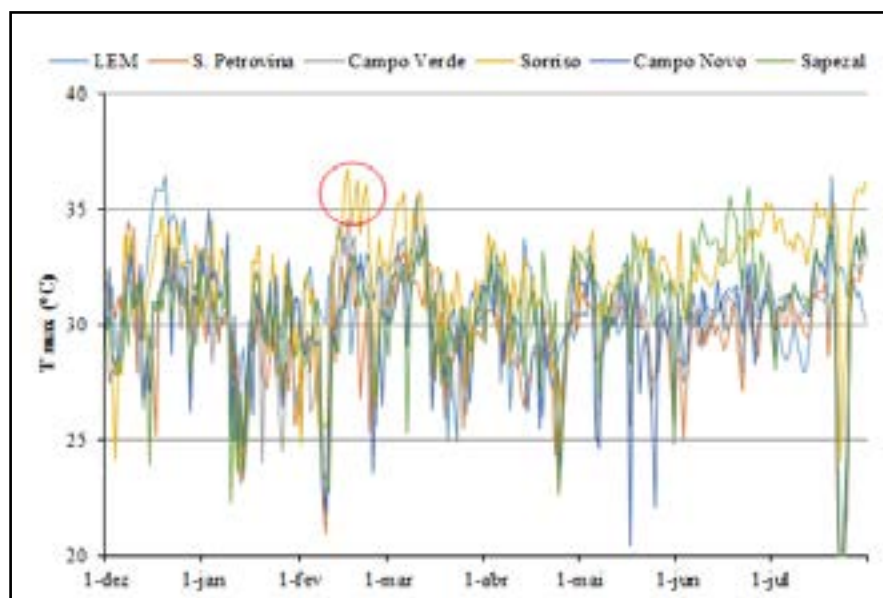


Figura 1. Dados de temperatura máxima em diferentes regiões produtoras de algodão do Brasil. Safra 12/13. (LEM: Luís Eduardo Magalhães). Fonte: Fundação MT e SOMAR.

1. Efeitos da temperatura sobre a germinação e desenvolvimento vegetativo

A temperatura desempenha um papel vital na germinação, no estabelecimento da população de plantas adequada, na frutificação e, conseqüentemente, na produtividade final do algodão. A temperatura mínima para

a germinação e emergência do algodoeiro é acima de 12°C (Ludwig, 1932). Temperaturas baixas durante a germinação e o desenvolvimento das plântulas, são importantes em cultivos de algodão em regiões de clima temperado que apresentam janela de plantio curta. Por exemplo, nos EUA, onde o problema de baixas temperaturas nesse período é comum, a recomendação para evitar prejuízos é que o plantio seja iniciado somente quando a temperatura do solo estiver acima de 15°C. Baixas temperaturas durante a fase inicial da cultura podem resultar em efeitos diretos, como morte da gema apical e má formação das radículas, e também em efeitos indiretos, como atraso na emergência, resultando em falhas na população de plantas (Gipson, 1986). A faixa ideal de temperatura para o desenvolvimento das raízes do algodão é entre 28°C e 35°C (Person et al., 1970). No caso de ocorrência de temperaturas fora desta faixa ótima (abaixo ou acima), as raízes podem apresentar baixa taxa de crescimento, diminuição da atividade enzimática dos tecidos e inibição de absorção de água e nutrientes (McMichael, 1986).

O estresse térmico por altas temperaturas é um fator que ocorre com maior frequência a partir do início do desenvolvimento vegetativo do algodoeiro, e seu efeito nessa fase pode resultar em decréscimo de área foliar (Reddy et al., 1992, 1995), diminuição da produção total de matéria seca (Reddy et al., 1991, 1995) e, por fim, aumento da proporção de ramos vegetativos em relação aos reprodutivos (Hodges et al., 1993). Embora o efeito da temperatura no desenvolvimento reprodutivo será considerado com mais detalhes na seção subsequente desta revisão, é importante enfatizar que, mesmo quando o número de posições frutíferas por planta for suficiente ou até maior, o estresse térmico pode diminuir a produtividade do algodoeiro pelo aumento da taxa de abortamento de botões florais e maçãs jovens (Hodges et al., 1993; Zhao et al., 2005).

Crescimento limitado de plantas induzido por estresse de altas temperaturas é resultado principalmente da diminuição da taxa de fotossíntese líquida, definida pela quantidade de CO₂ que é assimilado por uma determinada unidade de área foliar, após a subtração dos valores de perdas de carbono através da respiração e fotorrespiração. Na literatura, trabalhos de pesquisa relataram que os valores da fotossíntese líquida diminuem significativamente em temperaturas superiores a 35°C, tanto para o algodão Pima (*Gossypium barbadense*) quanto para o Upland (*Gossypium hirsutum*) (Salvucci e Crafts-Brandner, 2004; Wise et al., 2004; Snider et al., 2009; Snider et al., 2010). Este é um fenômeno comum que pode ser observado em várias espécies de plantas C₃. No caso do algodão, esse declínio no balanço da fotossíntese tem sido atribuído ao aumento da respiração (Hodges et al., 1991), ao aumento da fotorrespiração (Perry et al., 1983) e ao decréscimo na fotossíntese bruta devido à inibição da enzima RuBisCO (Salvucci e Crafts-Brandner, 2004), a alterações na estabilidade da membrana do tilacoide (Schrader et al., 2004) e a limitações no transporte de elétrons entre os aparatos da fotossíntese (Wise et al., 2004).

A produtividade da cultura é, em grande parte, determinada pela eficiência do sistema fotossintético por unidade de área de solo (Gardner et al., 1985). Desta forma, condições de altas temperaturas que propiciem

queda da eficiência fotossintética por unidade de folha e diminuição da área foliar podem ocasionar efeitos que levem à diminuição da disponibilidade de carboidratos e, conseqüentemente, à perda de produtividade final.

2. Efeito da temperatura no desenvolvimento reprodutivo

A temperatura tem alta influência nas fases do desenvolvimento reprodutivo, tanto antes quanto após a antese. A seqüência de desenvolvimento reprodutivo também é acelerada quando as temperaturas são mais altas, por exemplo, o tempo de desenvolvimento do primeiro botão floral, da primeira flor, do primeiro capulho, e a velocidade de aparecimento de flores na haste principal diminuem com o aumento da temperatura (Reddy et al., 1996, Hodges et al., 1993). Argumenta-se que esse encurtamento da janela de frutificação seja um limitante para que os fotoassimilados sejam transportados até as estruturas reprodutivas, resultando em anomalias na frutificação do algodão (Snider e Oosterhuis, 2012). Neste aspecto, a retenção de estruturas reprodutivas é tida como uma das mais sensíveis ao estresse de altas temperaturas, podendo, em alguns casos, ser completamente nula em temperaturas acima de 40°C (Hodges et al., 1993). Com resultados similares, Zhao et al. (2005) observaram uma forte correlação entre altas taxas de abscisão com baixo teor de carboidratos nos botões florais.

O dia da abertura da flor é um acontecimento crítico no desenvolvimento reprodutivo do algodoeiro, quando uma série de eventos deve ocorrer seqüencialmente no tempo correto para que haja sucesso na fertilização do óvulo e na formação das sementes. Dentro de um período de 24 horas a flor abre-se; após a polinização, o pólen germina na superfície do estigma, o tubo polínico cresce através do estilo e a fertilização do óvulo é finalizada. Dependendo do tempo, da duração e da severidade, o estresse térmico pode limitar a fertilização de diversas maneiras: inibindo o desenvolvimento do gametófito masculino (Jain et al., 2007) e feminino (Saini et al., 1983; Snider et al., 2009), paralisando a germinação do pólen (Burke et al., 2004; Kakani et al., 2005; Jain et al., 2007), limitando o crescimento do tubo polínico (Burke et al., 2004; Kakani et al., 2005; Hedhly et al., 2009; Snider et al., 2011c e 2011d) e alterando a formação de tecidos das anteras e do pistilo (Zinn et al., 2010). Como já foi mencionado, o sucesso do crescimento do tubo polínico e posterior fertilização do óvulo é um pré-requisito para a formação de sementes, e sementes associadas com as suas fibras são os principais componentes da produção de fibras. Portanto, qualquer estresse que limite o processo de polinização e/ou fertilização tem efeito direto na produtividade final do algodoeiro. É também importante notar que uma grande proporção dos óvulos disponíveis num dado ovário deve ser fertilizada para assegurar a retenção de frutos (Stewart, 1986). Por conseguinte, as limitações para o processo de fertilização podem ser pelo menos parcialmente responsáveis pela baixa retenção de maçãs em condições de altas temperaturas.

Assumindo que a eficiência da fertilização de óvulos é suficiente, e que a maçã em formação com 14 dias de idade não sofra abortamento, após este período, os impactos do estresse térmico no algodão parecem ser significativamente menores que no período de pico de floração. No entanto, durante o período pós-antese, é importante enfatizar o efeito da temperatura no balanço de fonte (fotossíntese) e dreno (frutos), devido ao fato de a concentração de carboidratos nos tecidos reprodutivos influenciar fortemente o enchimento dos frutos (Zhao et al., 2005; Snider et al., 2009)

3. Efeito da temperatura na produtividade

Por consequência de todos os aspectos que foram discutidos nesta revisão até o momento, a produtividade do algodoeiro é intimamente influenciada pela temperatura (Wanjura et al., 1969; Oosterhuis, 1999; Oosterhuis, 2002). Em resumo, o estresse térmico afeta a produtividade por meio de dois componentes principais da produção no algodoeiro: número e peso de capulhos. O número de capulhos dá-se em função do número de posições disponíveis de estruturas reprodutivas na planta, multiplicado pela taxa de retenção de estruturas reprodutivas. Como já citado anteriormente, o abortamento de botões florais e frutos é um dos processos mais sensíveis ao aumento de temperatura, portanto, temperaturas acima do ótimo podem causar perdas significativas na produtividade pela diminuição da taxa de retenção de frutos. O peso de capulho é definido pelo peso de fibra por semente e, principalmente, pela quantidade de sementes por fruto. Desta forma, o número de sementes por capulho é um importante componente da produção do algodoeiro.

Groves (2009) também enfatizou a importância do número de sementes na determinação da produtividade, informando que o número de sementes por hectare representa mais de 80% da variabilidade do rendimento total em algodão. A quantidade de sementes se dá em função do número de lóculos (carpelos) por capulho e do número de óvulos por lóculo (Stewart, 1986). Vários fatores, tais como a falta de fertilização, a paralisação do crescimento embrionário após a fertilização, a cultivar e as condições do ambiente pode também contribuir para a variação do número de sementes por capulho (Turner et al., 1977). Muitos pesquisadores demonstraram que o estresse de alta temperatura é um fator que afeta negativamente o desenvolvimento da semente. Por exemplo, Reddy et al. (1999) mostraram que temperaturas superiores a 26°C aumentaram a frequência de “motes” (sementes não desenvolvidas), e os possíveis motivos disso é que possa ter ocorrido uma inibição no desenvolvimento do pólen/óvulo ou um abortamento dos óvulos fertilizados logo após a ocorrência do evento da fertilização.

Isso também foi confirmado pelas observações de Lewis (2000), que, em uma comparação de um ano safra com temperatura amena na região Centro-Sul dos EUA (média de temperatura máxima diária em julho de 32,2°C) com a de um ano quente (média da temperatura máxima diária em julho

de 36,6°C), observaram que, no ano safra quente, o número de sementes diminuiu de 2,987 para 2,093 milhões por hectare. Este resultado foi associado a um menor número médio de sementes por capulho; 23,6 sementes por capulho no ano de temperatura alta em comparação com 28 sementes/capulho no de temperatura amena. Lewis conclui que aproximadamente 99% da variação no número de sementes por hectare no seu estudo de três anos foi explicada por flutuações nas temperaturas máximas no mês de julho (época de pico de floração do algodoeiro nos EUA). Pettigrew (2008) estudou por três anos o efeito do aumento de temperaturas em campo no algodão e observou que pequenas elevações de temperatura resultaram em: 1) menor número de nós acima da flor branca, indicando um adiantamento na maturidade da cultura; 2) diminuição no rendimento de fibra; e 3) redução em 10% nos valores da produtividade de fibra em dois dos três anos estudados (*figura 2*), esse resultado foi principalmente em consequência de maçãs 6% mais leves, com 7% menos sementes (*figura 2*). Ele conclui que, possivelmente, quando as temperaturas tornam-se muito quentes, a fertilização do óvulo é comprometida, resultando em capulhos com menor número de sementes e com menor densidade. A diminuição da eficiência de fertilização de óvulos sob temperaturas elevadas (38°C) foi posteriormente documentada por Snider et al., (2009, 2011b).

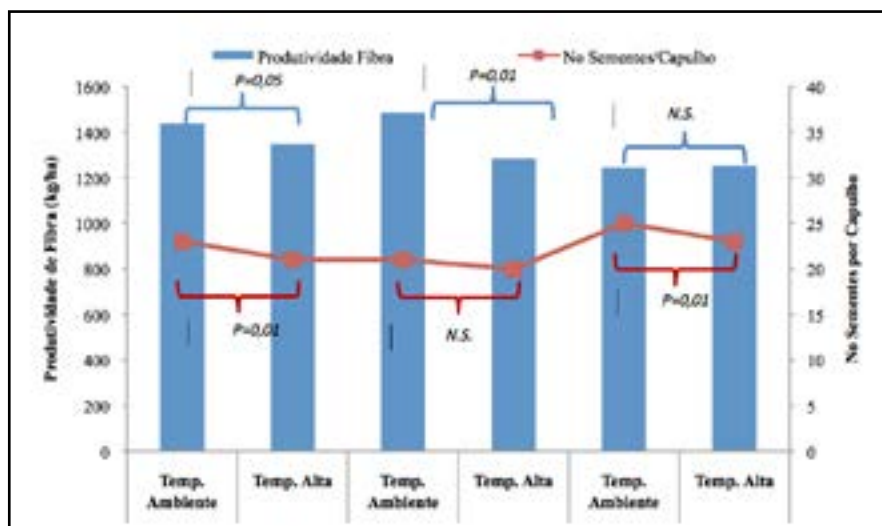


Figura 2. Efeito da temperatura na produtividade de fibra do algodão e no número de sementes por capulho, em diferentes safras (2003, 2004 e 2005). N.S.= Efeito estatisticamente não significativo ($P > 0,05$). Fonte: Pettigrew, 2008.

4. Efeito da temperatura na qualidade intrínseca da fibra

Para a obtenção de sucesso na cotonicultura, a qualidade intrínseca da fibra possui importância similar a da produtividade. Neste contexto, com relação a campo, três fatores influenciam diretamente a qualidade da fibra do algodoeiro: 1) potencial genético da cultivar; 2) flutuações climáticas ocorridas durante o ciclo da cultura; e 3) interação entre o genótipo e o ambiente (Bradow e Davidonis, 2010). Pelo fato de haver uma grande variação nos requisitos de qualidade entre produtores/fornecedores e consumidores de algodão, comercialmente há um sistema de ágio e deságio no preço do produto, de acordo com a qualidade final da fibra. Há diversos parâmetros para classificar a qualidade do algodão e, de modo geral, a qualidade da fibra é maior conforme há aumento dos valores do comprimento, da resistência e do micronaire. No entanto, especificamente para o micronaire, o desejável são valores entre 3,5 e 4,9.

O efeito do ambiente na qualidade intrínseca da fibra do algodão é variável e, principalmente, dependente do fator em questão; por exemplo, a influência da temperatura nos parâmetros de fibra ocorre na seguinte ordem: resistência \leq comprimento $<$ micronaire. A fibra de algodão é constituída principalmente por celulose (>90%), desta forma, espera-se que todo o fator que altere a síntese e a disponibilidade de carboidratos tenha algum efeito na qualidade final da fibra. A temperatura pode afetar a quantidade de carboidratos disponíveis para a formação da fibra, tanto indiretamente através do efeito na fixação de estruturas, alterando a quantidade de drenos, quanto diretamente, por meio da inibição da fotossíntese. Outra variável importante para o entendimento do efeito da temperatura na qualidade de fibra é a época e a intensidade do estresse. Para o comprimento de fibra, a fase mais crítica (elongação da fibra) ocorre no início, entre 25% e 40% do período total da formação de frutos. Já no caso da resistência e do micronaire, o intervalo mais importante dá-se no período final da formação de frutos (25% a 75%), quando ocorre a formação das paredes secundárias da fibra (Yeates et al., 2010).

A resistência é determinada pelo ângulo da deposição das camadas de celulose e também pelo grau de ligação das pontes de hidrogênio entre as microfibras de celulose das camadas primárias e secundárias da fibra. A influência da temperatura na definição da resistência da fibra do algodão é variável, com resultados inconsistentes. Há estudos nos quais não foi observado efeito da temperatura nos valores de resistência (Greef e Human, 1988; Green e Culp, 1990, Meredith, 2005). No entanto, quando há constatação de efeito significativo, a resistência tende a correlacionar-se positivamente com valores de temperatura máxima e média, indicando que temperaturas mínimas têm pouca influência na resistência da fibra do algodoeiro (Bradow e Davidonis, 2010). Similarmente, Yeates et al., (2010) observaram uma correlação linear positiva entre valores de temperatura média e resistência de fibra, mas o fator temperatura explicou somente 40% (r^2) da variabilidade nos valores de resistência. Em um experimento a campo,

Pettigrew (2008) constatou que fibras de algodão providas de tratamentos com temperaturas mais altas obtiveram um acréscimo de 3% nos valores de resistência. O motivo exato desse efeito nesse estudo não é claro, mas é possível que tenha havido aumento da quantidade de carboidratos disponíveis por número de óvulos, devido ao aumento da temperatura ter diminuído o número de sementes (Snider et al., 2009) e de maçãs (Zhao et al., 2005). Outra possibilidade para explicar a relação entre temperatura e resistência é que o aumento da temperatura pode favorecer o grau de deposição de celulose nas fibras do algodoeiro (Krieg e Hequet, 2005).

A definição do comprimento de fibra em função da temperatura também é variável, porém os resultados são mais consistentes quando comparados aos da resistência. Um fator que diferencia os dois parâmetros é que o comprimento é fortemente influenciado por temperaturas mínimas ou noturnas. O comprimento máximo da fibra é alcançado normalmente quando temperaturas noturnas se mantêm próximo aos 19°C e 20°C (Bradow e Davidonis, 2010). Resultados similares foram observados na Austrália, onde foi constatado que a equação para prever o comprimento da fibra em função da temperatura mínima é quadrática com r^2 variando de 36 a 82%, dependendo da cultivar em estudo (Yeates et al., 2010). Neste caso, o comprimento máximo foi obtido com temperaturas mínimas na ordem dos 18°C e 19°C, tanto temperaturas abaixo como acima destes valores resultaram em redução significativa do comprimento da fibra. Em se tratando de temperaturas médias para favorecer o comprimento de fibra durante o período de formação de maçãs, o ideal são temperaturas abaixo de 25°C (Reddy et al., 1999). Meredith (2005), estudando o efeito de temperaturas máximas entre 30°C e 35°C no comprimento, observou uma correlação linear negativa, na qual o aumento da temperatura máxima reduziu significativamente os valores de comprimento de fibra. Porém, em um dado interessante, sem uma explicação clara, o aumento da temperatura do ambiente resultou em redução na porcentagem do índice de fibras curtas (Reddy et al., 1999; Meredith, 2005). De acordo com a revisão bibliográfica de Bradow e Davidonis (2000), um detalhe importante na definição do comprimento de fibra é que somente o período inicial do processo de alongação da fibra depende da temperatura. Nesta fase, tanto temperaturas noturnas abaixo de 15°C quanto temperaturas diurnas acima de 34°C resultam em atraso da iniciação e da alongação da fibra. Assim, flutuações de temperatura durante a fase final da alongação não influenciam no comprimento da fibra. Esse fato pode ser um dos principais motivos que explicam a variação do efeito da temperatura no comprimento da fibra, pois fibras que foram prejudicadas por estresse térmico na fase inicial têm a possibilidade de recuperar-se por meio de um prolongamento do período de alongação.

Dentre todos os parâmetros de qualidade intrínseca da fibra do algodão, o micronaire é o que mais sofre influência do ambiente; ele é caracterizado por ser uma medição indireta da finura (espessura) e do grau de maturação da fibra. Assim, o valor de micronaire é proveniente de uma interpolação dos dados de maturidade *versus* densidade linear da fibra. A obtenção de um tecido de qualidade é possível quando a matéria-prima apresenta uma

fibra fina e madura, possibilitando a confecção de um fio de alta resistência com tingimento uniforme. Como já foi mencionado, em termos de micronaire, o desejável para que haja este equilíbrio entre espessura e maturação são fibras apresentando valores entre 3,5 e 4,9, com ótimo entre 3,7 e 4,2 (Bradow e Davidonis, 2010). Porém, devido ao fato de o micronaire ser uma medida indireta, mesmo com valores na faixa ótima, há a possibilidade de que a fibra em questão seja grossa e imatura.

Dentre as variáveis ambientais, a temperatura é o fator que apresenta maior influência nos valores de micronaire da fibra (Bange et al., 2009). A definição da finura ou espessura da fibra tem pouca correlação com a temperatura do ambiente, sendo, neste caso, a genética o fator mais importante. No entanto, para o processo de maturação, a temperatura é o fator mais determinante (Bradow e Bauer, 1997; Pettigrew, 2008); a maturação da fibra é caracterizada pela deposição de celulose nas camadas secundárias e, proporcionalmente, isso representa quase 98% da espessura total da parede estrutural da fibra (Bradow e Davidonis, 2000). Desta forma, qualquer interferência ambiental no processo pode resultar em mudanças significativas na maturidade, o que consequentemente afeta os valores de micronaire. A temperatura influencia o micronaire da fibra de três maneiras diferentes: 1) afetando a fotossíntese, o que pode diminuir a disponibilidade de carboidratos para a formação da fibra (Snider et al., 2009); 2) interferindo no processo de deposição de celulose nas camadas secundárias (Bange et al., 2010); e 3) alterando a densidade linear da fibra (Krieg e Hequet, 2005).

Na Austrália, em 23 anos de estudo comparando o comportamento do micronaire da fibra de uma mesma cultivar, concluiu-se que os valores variaram até 1,4 entre regiões de cultivo e até 1,2 entre safras diferentes dentro da mesma região (Kelly et al., 2008). Além disso, Bange et al. (2009) observaram que o algodão colhido na Austrália, entre as safras 2004 e 2007, foi classificado, em média, 41% com micronaire acima de 4,6 e 6% acima de 5,0. O mesmo estudo concluiu ainda que a temperatura foi um dos principais fatores responsáveis pelo resultado. Recentemente, Bange et al. (2010) realizaram um estudo para analisar o efeito da temperatura no micronaire da fibra do algodão. Os resultados indicaram que tanto a temperatura média quanto a mínima do dia tiveram correlação linear positiva com os valores de micronaire; em ambos os casos, a temperatura explicou 68% da variação nos valores. O modelo linear positivo da temperatura média (*figura 3*) desse trabalho sugeriu que cada grau Celsius de aumento na média da temperatura durante a fase de maturação resultou em aumento de 0,19 unidade nos valores de micronaire.

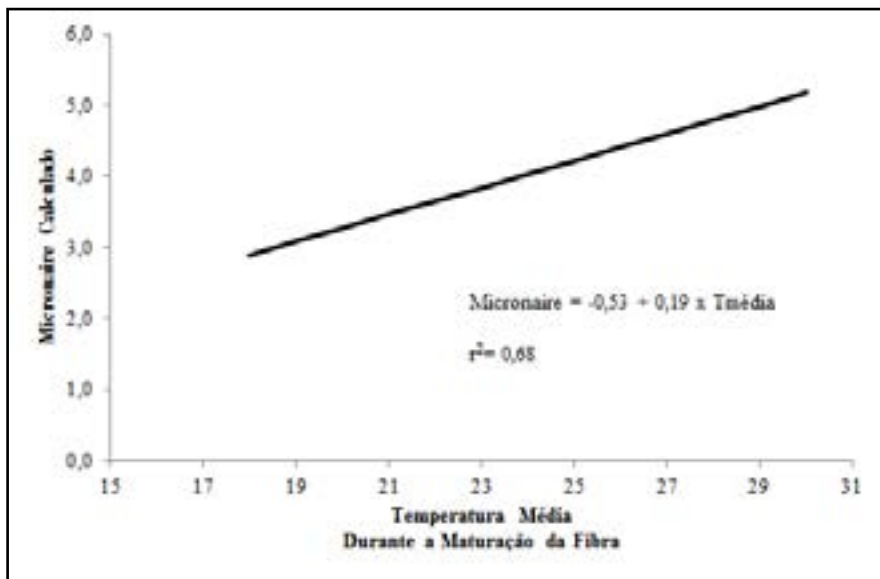


Figura 3. Correlação linear entre micronaire e temperatura média durante a maturação de fibra.

Fonte: Bange et al. 2010.

Com resultados similares, Kelly et al. (2008) concluíram que temperaturas médias inferiores a 22°C e acima de 28°C aumentam a probabilidade da ocorrência de micronaire abaixo de 3,5 e acima de 4,9, respectivamente. Os motivos principais desta correlação estão ligados ao fato de que ambientes mais quentes propiciam uma maior deposição de celulose de qualidade cristalina (alta densidade), enquanto ambientes mais frios diminuem a deposição, e a qualidade da celulose é amorfa (baixa densidade; Krieg e Hequet, 2005). De acordo com isso, dados de temperatura média da safra 12/13 em diferentes regiões produtoras de algodão no Brasil (*figura 4*) sugerem que a região de Sorriso é a mais propícia para a ocorrência de índices micronaire mais altos e que plantios após a segunda quinzena de janeiro aumentam a probabilidade de índices mais baixos. A correlação negativa entre a data de plantio e os valores de micronaire também foram relatados, tanto na Austrália (Bange et al. 2009, Bange et al. 2010, Bange et al. 2012) quanto nos EUA (Bradow e Bauer, 1997). Estes estudos concluíram que o micronaire da fibra tende a ser menor quando há atraso na data de plantio. No entanto, nem sempre estes resultados se repetem, podendo haver também um efeito de interação entre genótipo e ambiente (Pettigrew, 2008; Yeates et al. 2010).

Uma avaliação da safra 12/13, em Mato Grosso, utilizando dados de HVI dos mesmos genótipos para todos os locais e épocas de plantio (*figura 5*), indicou que, na média das épocas de plantio e dos locais testados, o micronaire da região de Sorriso (Mic=4,48) foi superior aos de Campo Novo, Alto Garças e de Campo Verde. Em relação à época de plantio, os resultados

foram similares aos relatados na literatura; o atraso na data de semeadura resultou em decréscimo nos valores de micronaire em até 0,25 unidade em média. Nesse caso, fibras de algodão com plantio realizado em meados de dezembro, início de janeiro, e final de janeiro apresentaram micronaire médio nos valores de 4,36, 4,28, e 4,11, respectivamente.

Apesar de todos esses fatos que confirmam o efeito da temperatura na qualidade da fibra, é importante lembrar que outros fatores ambientais restritivos, como falta de precipitação e/ou diminuição da disponibilidade de radiação solar devido a períodos de nebulosidade e efeito do solstício, também têm influência na determinação da qualidade final da fibra.

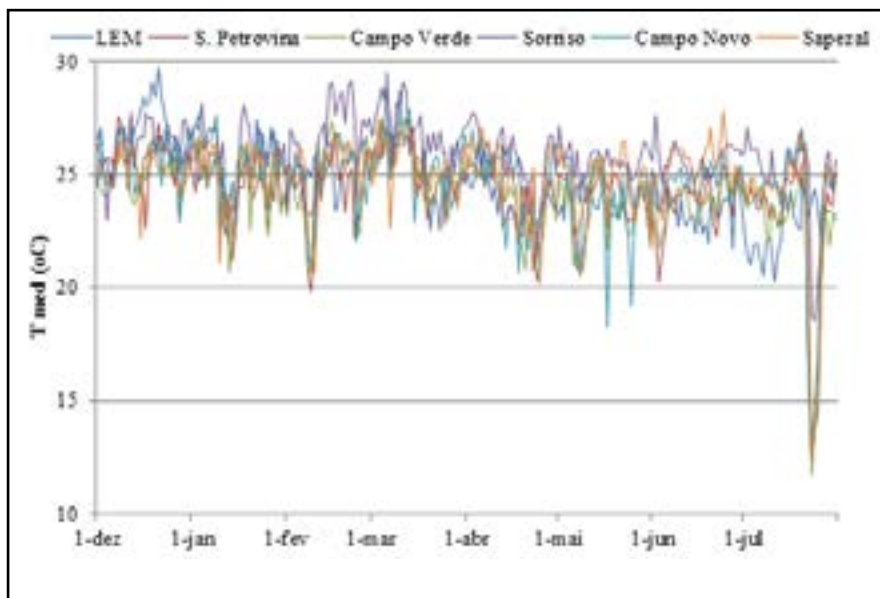


Figura 4: Dados de temperatura média em diferentes regiões produtoras de algodão do Brasil. Safra 12/13. (LEM = Luís Eduardo Magalhães). Fonte: Fundação MT e SOMAR.

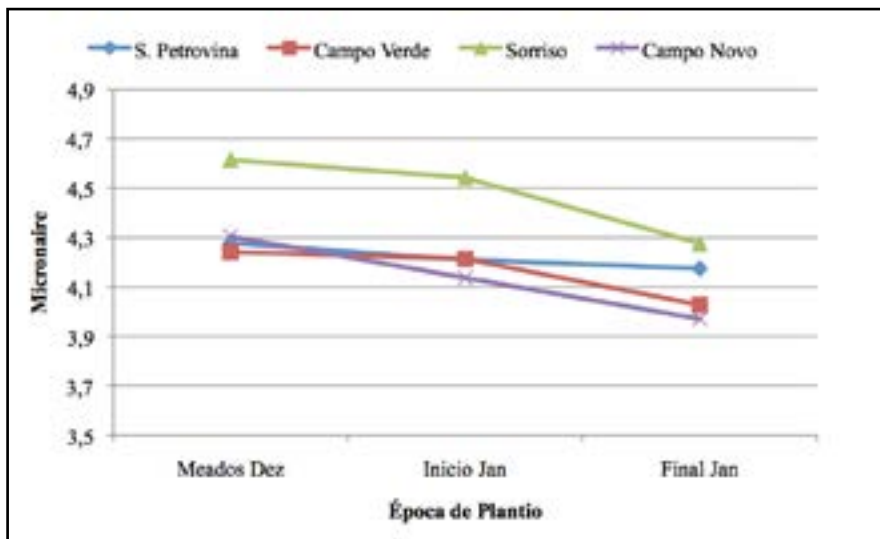


Figura 5. Resultados médios de micronaire em relação a três épocas de plantio e diferentes regiões produtoras de algodão no Mato Grosso. Safra 12/13. Dados de ensaio de Caracterização Varietal da Fundação MT, média de 19 genótipos de algodão.

A temperatura é, sem dúvida, um fator abiótico que afeta diretamente o sistema de produção do algodão, por isso, o entendimento destes efeitos é uma ferramenta importante para diminuir as possibilidades de perda de potencial produtivo e qualidade da fibra. É evidente que, atualmente, não há dados concretos de que a temperatura esteja causando perdas de produtividade no Brasil, pois, de modo geral, as temperaturas nas regiões produtoras estão bem próximas do intervalo ótimo para o desenvolvimento do algodoeiro. Porém, há indícios de que em nossas condições de cultivo a temperatura seja um dos fatores que estejam afetando os parâmetros de qualidade da fibra, em especial o micronaire. Neste aspecto, o produtor deve ficar atento ao posicionamento das cultivares em relação à época de plantio, lembrando o fato de que temperaturas mais amenas ($T_{\text{média}} < 22^{\circ}\text{C}$) durante a maturação da fibra favorecem a ocorrência de índices de micronaire mais baixos ($< 3,5$).

Referências bibliográficas

BANGE, M., CATON, J.; HODGSON, D. In: http://www.regional.org.au/au/asa/2012/crop-production/8091_bangempb.htm 2012.

BANGE, M. P.; CONSTABLE, G. A.; JOHNSTON, D. A.; KELLY, D. 2010. A method to estimate the effects of temperature on cotton micronaire. **Journal of Cotton Science** 14, 164-172.

BANGE, M. P., CONSTABLE, G. A., GORDON, S. G., NAYLOR, G. R. S.; VAN DER SLUIJS, M. H. J. **FIBREpak A guide to improving Australian cotton fibre quality**. CSIRO and the Cotton Catchment Communities Cooperative Research Centre, Narrabri, Australia. 2009.

BRADOW, J. M.; BAUER, P. J. 1997. Fiber-quality variations related to cotton planting date and temperature. pp. 1491-1495. In: **Beltwide Cotton Conferences Proceedings**, 6-10 January, New Orleans, LA.

BRADOW, J. M.; DAVIDONIS, G. H. Quantification of cotton fibre quality and cotton production - processing interface: A Physiologists Perspective. **The J. Cot. Sci.**, 4, 36-64. 2000.

BRADOW, J. M.; DAVIDONIS, G. H. Effect of environment on fiber quality. pp. 229-245. In: STEWART, J. M., OOSTERHUIS, D. M., HEITHOLT, J. e MAUNEY, J. R. (eds.). **Physiology of Cotton**. Springer. 2010.

BURKE, J. J.; VELTEN, J.; OLIVER, M. J. In vitro analysis of cotton pollen germination. **Agron. J.** 96:359-368. 2004.

EPA. **Future Temperature Changes**, 2013 In: <http://www.epa.gov/climate-change/science/future.html#Temperature>

GARDNER, F.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. **Physiology of Crop Plants**. Iowa State Univ. Press, Ames, IA, 323 pages. 1985.

GIPSON, J. R. Temperature Effects on Growth, Development and Fiber Properties. In: MAUNEY, J.R.; STEWART, J. McD. (Eds). **Cotton physiology**. Memphis, Tennessee: The Cotton Foundation Publisher, p. 47-56. 1986

GREEF, A. I.; HUMAN, J. J. The effect of date of planting on the fibre properties of four cotton cultivars grown under irrigations. **S. Afr. J. Plant Soil** 5:167-172. 1988.

GREEN, C. C.; CULP, T. S. Simultaneous improvements of yield, fiber quality, and yarn strength in upland cotton. **Crop Sci.** 30:66-69. 1990.

GROVES, F. E. Improvement of cotton through selective use of lint and seed parameters. Ph.D. Dissertation. University of Arkansas, 2009. Fayetteville: ProQuest LLC. 2009.

HALL, A. E. 2001. Crop responses to environment. CRC Press, Boca Raton, FL. Pp. 232.

HEDHLY, A.; HORMAZA, J. I.; HERRERO, M. Global warming and sexual plant reproduction. **Trends Plant Sci.** 14:30-36. 2009.

HODGES, H. F.; REDDY, K. R.; MCKINNON, J. M.; REDDY, V. R.; **Temperature effects on cotton**. Mississippi Agr. & Forestry Exp. Sta., Mississippi State University, MS. 1993.

HODGES, H. F.; REDDY, V. R.; REDDY, K. R. Mepiquat chloride and temperature effects on photosynthesis and respiration of fruiting cotton. **Crop Sci** 31:1302-1308. 1991.

JAIN, M.; PRASAD, P. V. V.; BOOTE, K. J.; HARTWELL, A. L.; CHOUREY, P.S. Effects of season-long high temperature growth conditions on sugar-to-starch metabolism in developing microspores of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Planta** 227:67-69. 2007.

KAKANI, V. G.; REDDY, K. R.; KOTI, S.; WALLACE, T. P.; PRASAD, P. V. V.; REDDY, V. R.; ZHAO, D. Differences in vitro pollen germination and pollen tube growth of cotton cultivars in response to high temperature. **Ann. Bot.** 96:59-67. 2005.

KELLY, D.; BANGE, M. P.; CONSTABLE, G. A. Unravelling the Micronaire challenge. Em: **Proc. 14th Aust. Cotton Conf.** 12-14 August, Gold Coast Aust. (The Aust. Cotton Growers Research Organization). 2008.

KRIEG, D. R. Feedback control and stress effects on photosynthesis. Em: MAUNEY, J. R. e STEWART, J. M. (Eds). **Cotton Physiology**. Memphis, TN: The Cotton Foundation, p 227-243. 1986.

KRIEG D. R.; HEQUET, E. F. Fiber Quality Variation within a Cotton Plant as Affected by Genetics and Environment. **Proc. Beltwide Cotton Conferences**, National Cotton Council, January 4-7, 2005, New Orleans LA, USA., 6 pages. 2005.

LEWIS, H. Environmental regulation of yield and quality components in American upland cotton. **Proceedings conference Genetic control of fiber and seed quality**. pp. 8-36. Cotton Incorporated, Cary, NC. 2000.

LUDWIG, C. A. The germination of cottonseed at lo temperatures. **J. Agr. Res.** 44:367-380. 1932.

MEREDITH, W. R. J. Influence of cotton breeding on yield and fiber quality problems. Em. <http://www.cottoninc.com/fiber/quality/Fiber-Management/Conferences/2005-Conference/GeorgiaCottonUpdateMeredith.pdf> 2005.

McMICHAEL, B. L. Growth of roots. pp. 29-38. In: J.R. Mauney e J.M. Stewart (eds.) **Cotton physiology**. The Cotton Foundation, Memphis, TN. 1986.

OOSTERHUIS, D. M. Yield response to environmental extremes in cotton.

p. 30–38. In: Oosterhuis, D. M. (ed.) **Proc. 1999 Cotton Research Meeting** Summary Cotton Research in Progress. Report 193. Arkansas Agric. Exp. Stn., Fayetteville, AR. 1999.

OOSTERHUIS, D. M. **Day or night high temperature**: A major cause of yield variability. *Cotton Grower* 46:8–9. 2002.

OOSTERHUIS, D. M.; SNIDER, J. L. High temperature stress on floral development and yield of cotton in OOSTERHUIS, D. M. (ed.) **Stress physiology in cotton**. Cotton Foundation, Cordova, TN. 2011.

PEARSON, R. W.; RATLIFF, L. R.; TAYLOR, H. M. Effect of soil temperature, strength and pH on cotton seedling root elongation. **Agron. J.** 62:243-246. 1970.

PERRY, S. W.; KRIEG, D. A.; HUTMACHER, R. B. Photosynthetic rate control in cotton. **Plant Physiol.** 73:662-665. 1983.

PETTIGREW, W. T. The effect of higher temperatures on cotton lint yield production and fiber quality. **Crop Sci.** 48:278-285. 2008.

REDDY, K. R., DAVIDONIS, G. H., JOHNSON, A. S.; VINYARD, B. T. Temperature regime and carbon dioxide enrichment alter cotton boll development and fiber properties. **Agronomy Journal**, 91(5), 851-858.1999.

REDDY, V. R.; BAKER, D. N.; HODGES, H. F. Temperature effect on cotton canopy growth, photosynthesis and respiration. **Agron. J.** 83:699–704. 1991.

REDDY, K. R.; REDDY, H. F.; HODGES, H. F. Temperature effects on early season cotton growth and development. **Agron. J.** 84:229-237. 1992.

REDDY, K. R.; HODGES, H. F.; MCKINION, J. M. Carbon dioxide and temperature effects on pima cotton development. **Agron. J.** 87:820-826. 1995.

REDDY, V. R.; HODGES, H. F.; MCCARTY, W. H.; MCKINNON, J. M. **Weather and cotton growth**: Present and Future. Mississippi Agr. & Forestry Exp. Sta., Mississippi State University, Starkville, MS.1996.

SALVUCCI, M. E.; CRAFTS-BRANDNER, S. J. Relationship between the heat tolerance of photosynthesis and thermal stability of RuBisCO activase in plants from contrasting thermal environments. **Plant Physiol** 134:1460-70. 2004.

SAINI, H. S.; SEDGLEY, M.; ASPINALL, D. Effect of heat stress during floral development on pollen tube growth and ovary anatomy in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Aust. J. Plant Physiol.** 10:137–144. 1983.

SCHRADER, S. M.; WISE, R. R.; WACHOLTZ, W. F.; ORT, D. R.; SHARKEY, T.

D. Thylakoid membrane responses to moderately high leaf temperature in Pima cotton. *Plant Cell Environ* 27:725–735. 2004.

SNIDER J.L.; OOSTERHUIS D.M.; KAWAKAMI E.M.. Genotypic differences in thermotolerance are dependent upon pre-stress capacity for antioxidant protection of the photosynthetic apparatus in *Gossypium hirsutum*. **Physiol Plant** 138:268–277. 2010

SNIDER, J. L.; OOSTERHUIS, D. M. Heat stress and pollen-pistil interactions. pp. 59-78. In: D. M. OOSTERHUIS and J. T. COTHREN (Eds.) **Flowering and Fruiting in Cotton**. Publ. Cotton Foundation, Memphis, TN. 2012.

SNIDER, J. L.; OOSTERHUIS, D. M.; KAWAKAMI, E. M. Genotypic differences in thermotolerance are dependent upon pre-stress capacity for antioxidant protection of the photosynthetic apparatus in *Gossypium hirsutum*. **Physiol. Plant.** 138:268-277. 2011a.

SNIDER, J. S.; OOSTERHUIS, D. M.; KAWAKAMI, E. M. Mechanisms of reproductive thermotolerance in *Gossypium hirsutum*: the effect of genotype and exogenous calcium application. **J Agron Crop Sci** 197: 228-236. 2011b.

SNIDER, J. S.; OOSTERHUIS, D. M.; LOKA, D. A.; KAWAKAMI, E.M. High temperature limits in vivo pollen tube growth rates by altering diurnal carbohydrate balance in field-grown *Gossypium hirsutum* pistils. **J Plant Physiol** 168:1168-1175. 2011c.

SNIDER, J. L.; OOSTERHUIS, D. M.; KAWAKAMI, E. M. Diurnal pollen tube growth rate is slowed by high temperature in field-grown *Gossypium hirsutum* pistils. **J. Plant Physiol.** 168:441-448. 2011d.

SNIDER, J. L.; OOSTERHUIS, D. M.; SKULMAN, B. W.; KAWAKAMI, E. M. Heat stress-induced limitations to reproductive success in *Gossypium hirsutum*. **Physiol. Plant.** 137:125-138. 2009.

STEWART, J. M. Integrated events in flower and fruit. pp. 261-300. In MAUNEY, J. R. and STEWART, J. M. (eds.) **Cotton physiology**. The Cotton Foundation, Memphis, TN. 1986.

TURNER, J. H.; STEWART, J. M.; HOSKINSON, P. E.; RAMEY, H. H. Seed setting efficiency in eight cultivars of upland cotton. **Crop Sci.** 17:769-772. 1977.

WANJURA, D. F.; HUDSPETH, E. B.; JR.; BILBRO, J. D. JR. Emergence time, seed quality, and planting depth effects on yield and survival of cotton. (*Gossypium hirsutum* L.). **Agron. J.** 61:63-65. 1969.

WISE, R. R.; OLSON, A. J.; SCHRADER, S. M.; SHARKEY, T. D. Electron transport is the functional limitation of photosynthesis in field-grown Pima cotton

plants at high temperature. **Plant Cell Environ.** 27:717-724. 2004.

YEATES, S. J.; CONSTABLE, G. A.; MCCUMSTIE, T. Irrigated cotton in the tropical dry season. I: Yield, its components and crop development. **Field Crops Research** 116:3, 278-289. 2010.

ZHAO, D.; REDDY, K. R.; KAKANI, V. G.; KOTI, S.; GAO, W. Physiological causes of cotton fruit abscission under conditions of high temperature and enhanced ultraviolet-B radiation. **Physiol. Plant.** 124:189-199. 2005.

ZINN, K. E.; TUNC-OZDEMIR, M.; HARPER, J. F. Temperature stress and plant sexual reproduction: uncovering the weakest links. **J. Exp. Bot.** 61:1959-1968. 2010.

CAPÍTULO 2

ESTRESSE LUMINOSO

Efeitos do estresse luminoso na fisiologia do algodoeiro

Fábio R. Echer

Instituto Mato-grossense do Algodão

Ciro A. Rosolem

Unesp/Botucatu

A fotossíntese, processo pelo qual as plantas transformam energia luminosa em energia química (carboidratos), é uma das reações químicas mais importantes do planeta, pois sem ela não haveria produção de alimentos, fibras e combustíveis, inclusive os fósseis. A luz fornece energia para oxidação da água, que gera elétrons (energia) para as fases seguintes da fotossíntese, fixando o CO₂ do ambiente, gerando ainda O₂, o que possibilita a respiração de todos os organismos multicelulares (Malkin e Niyogi, 2000). Portanto, a fotossíntese não ocorre sem os substratos básicos: a água, a luz e o CO₂, conforme a equação a seguir. Especificamente, a energia luminosa dirige a síntese de carboidratos e a liberação de oxigênio a partir de gás carbônico e água.



Quaisquer fatores limitantes, sejam diretos, como a água, luz e CO₂, ou indiretos como temperatura e a nutrição da planta, podem alterar a resposta fotossintética da planta, em maior ou em menor grau.

A luminosidade é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes (clorofilas e carotenoides) localizados nos cloroplastos, no comprimento de onda (λ) que vai de 400 a 700 nm (nanômetros), sendo esta denominada radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (Monteith, 1972). Os pigmentos fotossintéticos possuem diferentes picos de absorção, conforme mostra a *figura 1*. Destaque para a curva 2 (clorofila *a*), que possui dois picos de absorção, o primeiro no comprimento de onda da região do azul (430 nm) e o segundo no vermelho (660 nm). A clorofila *b* também apresenta dois picos de absor-

ção, e o principal ocorre no $\lambda = 470$ nm, também na região do azul. Ainda, os carotenoides (curva 5) possuem quase toda sua capacidade de absorção no λ de 400 a 500 nm (azul). Os carotenoides são conhecidos como pigmentos acessórios, pois a luz absorvida por eles é transferida para a clorofila para o processo da fotossíntese. Os carotenoides também exercem um papel de proteção da planta aos danos causados pela luz (Taiz e Zeiger, 2010). Os pigmentos fotossintéticos são responsáveis por captar a luz e transferir a energia para o complexo dos centros de reação, onde ocorrem as reações químicas de oxidação e redução.

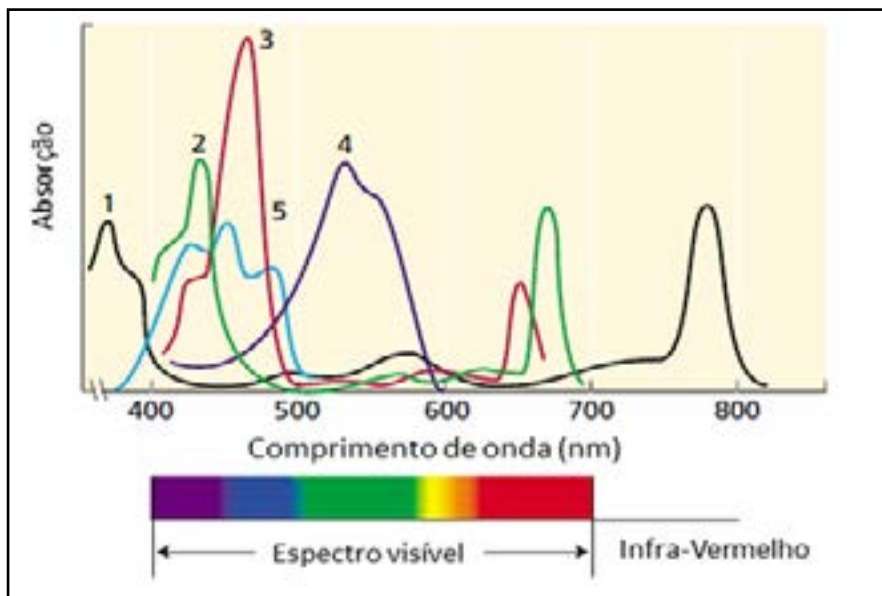


Figura 1. Espectros de absorção de alguns dos pigmentos da fotossíntese. Curva 1(—), bacterioclorofila *a*; curva 2 (—), clorofila *a*; curva 3 (—), clorofila *b*; curva 4 (—), ficoeritrobilina e curva 5 (—), β -caroteno. Adaptado de Taiz e Zeiger (2010).

1. Fatores que afetam a eficiência fotossintética

1.1. Idade do tecido e luminosidade

Mudanças na eficiência fotossintética resultam do desenvolvimento ou da senescência das folhas. Os eventos fisiológicos que ocorrem com o início da senescência vão da diminuição do teor de clorofila, seguida do amarelecimento dos tecidos fotossintéticos e a degradação consecutiva e gradual dos cloroplastos, incluindo membranas, proteínas, estroma, enzimas e a perda da integridade do cloroplasto (Woolhouse, 1987). A senescência foliar está ligada à competição entre órgãos pelo nitrogênio, particularmente durante a formação e armazenamento de reservas nas sementes, pois, por

ser móvel na planta, o N é translocado para órgãos mais novos, que estão em desenvolvimento (Thayer et al., 1987).

Em condições de campo, a longevidade das folhas é, em média, de 56 dias (Farbhoother, 1965 citado por Hearn, 1976), mas, sob condições ótimas, pode chegar a 70 dias (Wullschleger e Oosterhuis, 1990a). Apesar disso, a maior contribuição para a fixação de carbono ocorre quando a folha atinge entre 25-30 dias, como é mostrado na figura 2, pois conforme as folhas envelhecem, sua resposta ao aumento da intensidade luminosa diminui (Echer e Rosolem, no prelo), uma vez que a habilidade das folhas para alterar o sistema fotossintético em resposta à luminosidade do ambiente depende do estágio de desenvolvimento do tecido (Krieg, 1988). A adaptação das folhas à quantidade de luz disponível torna-se importante à medida que as folhas envelhecem e vão sendo sombreadas pelas folhas da parte superior da planta (*figura 3*), reduzindo sobremaneira a taxa fotossintética, especialmente em folhas dos nós da parte basal da planta (Wullschleger e Oosterhuis, 1990b).

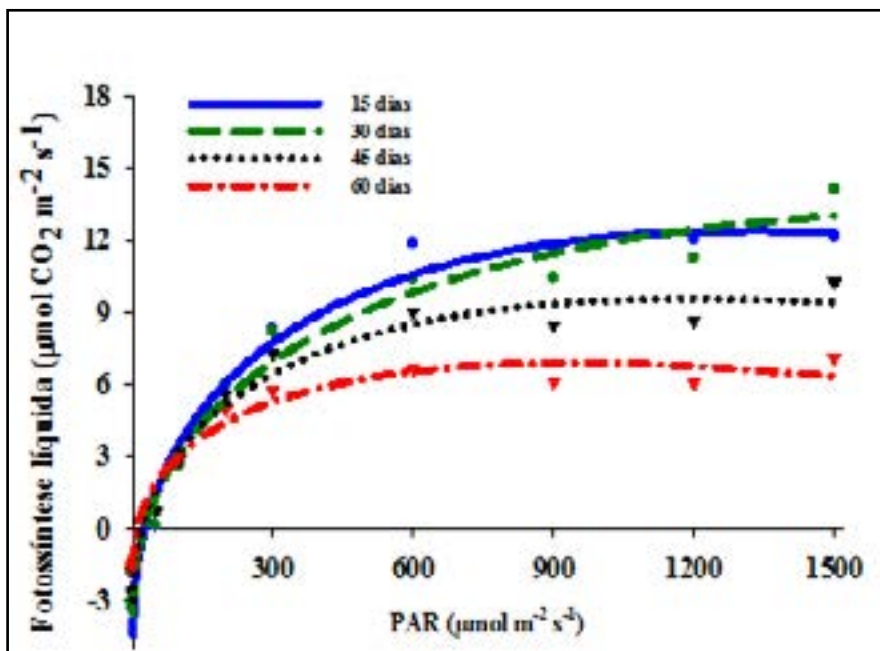
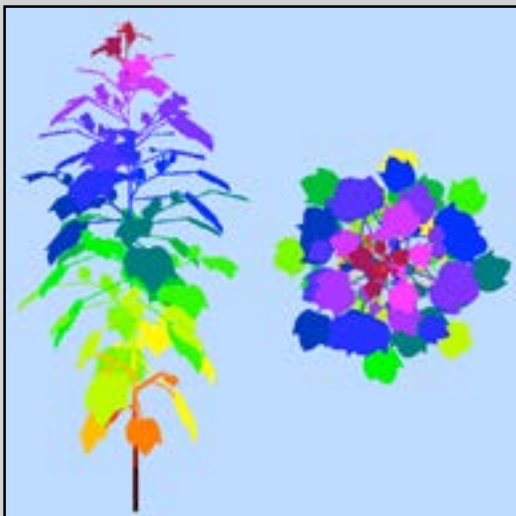


Figura 2. Fotossíntese líquida de folhas de algodão com idades de 15 (●), 30 (●), 45 (▼) e 60 (▼) dias em função intensidade luminosa (PAR). Fonte: Echer e Rosolem (no prelo).

Figura 3. Representação gráfica da distribuição da luz no interior da planta do algodoeiro. As diferentes cores indicam a quantidade de luz interceptada por cada folha em relação a sua posição no dossel. Nota-se que as folhas da base da planta recebem baixa luminosidade (figura da direita). Fonte: Room e Hanan (1995).



Assim, os fatores primários responsáveis pela redução da atividade fotossintética das folhas são a idade da folha e a quantidade de luz do ambiente. A eficiência de uso da luz também é afetada pelo histórico ambiental, ou seja, folhas que foram produzidas em condições de pouca luminosidade atingem a máxima taxa fotossintética sob menor intensidade luminosa que folhas desenvolvidas em um ambiente de alta luminosidade (Landivar et al., 2010), conforme pode ser observado na *figura 4*, em que folhas de 15 dias de idade foram aclimatadas na sombra (redução de 50% da luminosidade) por quatro dias; porém, mesmo após o aumento da intensidade luminosa (PAR), as folhas não recuperaram sua capacidade fotossintética (Echer e Rosolem, no prelo).

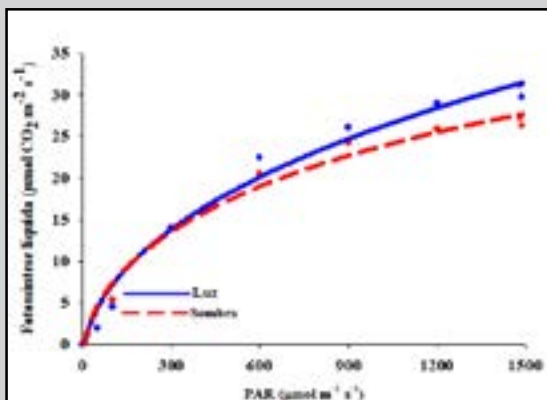


Figura 4. Fotossíntese líquida de folhas de algodão com idade de 15 dias, submetidas ao pré-condicionamento à sombra (—) ou à luz plena (—), em função do fluxo de fótons (PAR). Sombra (50% de redução na incidência de luz) mantida nos quatro dias que precederam a avaliação. Fonte: Echer e Rosolem (no prelo).

Apesar das diferenças significativas da intensidade luminosa na taxa fotossintética em cada idade da folha, principalmente até 35-45 dias, este último é o fator que mais reduz a resposta fotossintética da folha (*figura 5*) (Sassenrath-Cole et al., 1996).

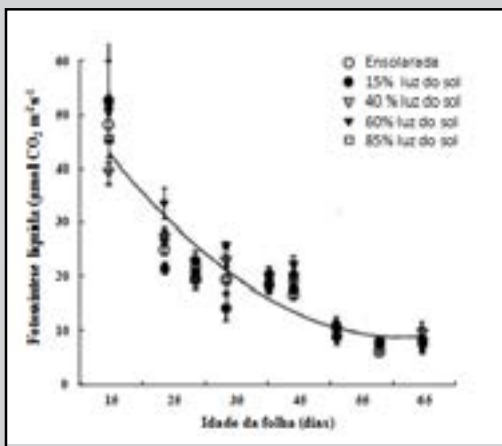


Figura 5. Taxa fotossintética sob luminosidade saturada em diferentes idades da folha e nível de luminosidade. (Adaptado de Sassenrath-Cole et al., 1996).

1.2. Efeito da sombra sobre a produtividade e a qualidade da fibra

Atualmente, o sistema de cultivo do algodoeiro no Estado de Mato Grosso é realizado majoritariamente em condições não irrigadas, ficando, portanto, dependente da ocorrência das chuvas. Por sua vez, a distribuição das chuvas ocorre de maneira bastante irregular; primeiro por existirem duas estações bem definidas, uma com inverno seco e outra com verão chuvoso (*gráfico 1*). Segundo, dentro da estação chuvosa (setembro-março), ocorre grande concentração das chuvas nos meses de janeiro e fevereiro, justamente o período de estabelecimento do algodoeiro no campo.

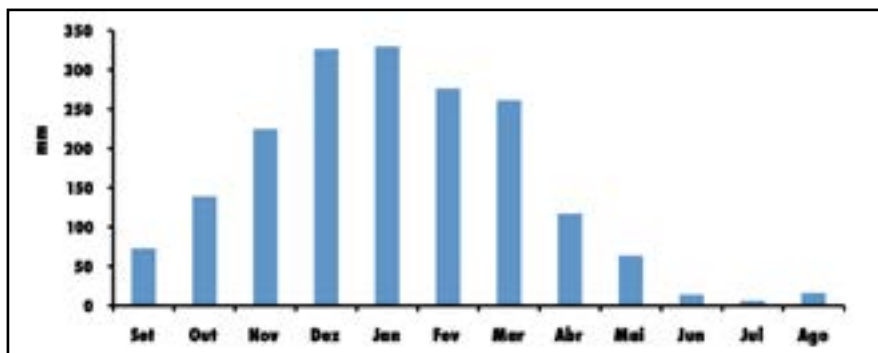


Gráfico 1. Distribuição de chuvas ao longo do ano no município de Primavera do Leste. Dados referentes à média histórica. Fonte: Fietz et al. (2008).

Nesses meses, as plantas atingem os estádios de botão floral, e tem início o florescimento; a diminuição da luminosidade nessa fase acarreta abortamento excessivo das estruturas reprodutivas, devido à redução na produção de carboidratos, que é governada pela relação entre o conteúdo de auxinas e etileno/ácido abscísico (Guinn, 1974). A taxa de abscisão de maçãs em resposta à baixa luminosidade parece ser mais rápida que a dos botões florais, pois o início do abortamento de maçãs jovens ocorreu simultaneamente à remoção do estresse, enquanto que os botões florais começaram a ser abortados cerca de 3-4 dias após o fim do estresse (*gráfico 2*). Quanto à sensibilidade das estruturas reprodutivas, há duas fases em que elas estão mais susceptíveis ao aborto. A primeira inicia-se após a emissão do botão floral, e a susceptibilidade à queda diminui com a proximidade da abertura da flor. A segunda fase vem em seguida à antese, cujas maçãs pequenas são altamente susceptíveis ao abortamento, e conforme a parede celular vai ficando mais lenhosa, reduz-se significativamente o risco de queda do fruto, por volta de 14 dias após a abertura da flor.

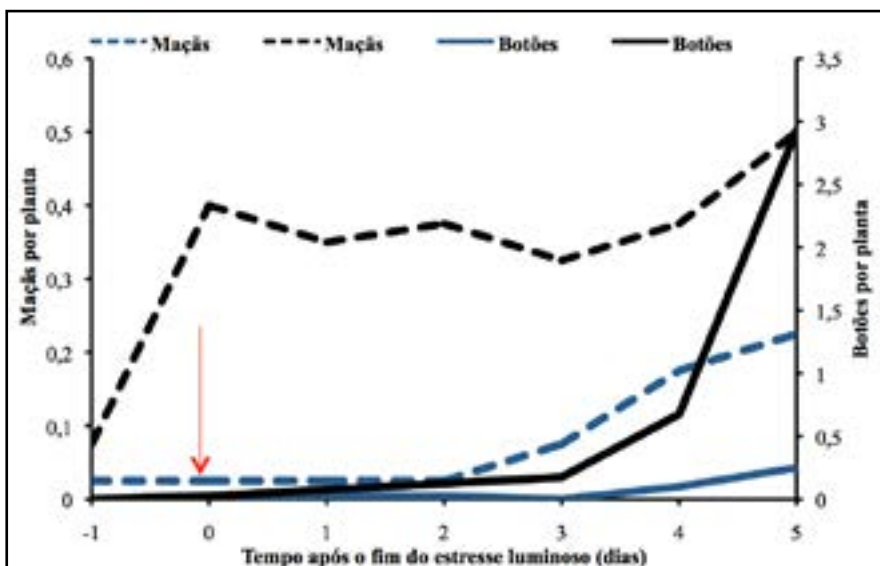


Gráfico 2. Número de maçãs e botões florais abortados por planta nos tratamentos controle e com pouca luz, em relação ao período após o fim do estresse. No tratamento com pouca luz, as plantas foram submetidas à redução da luminosidade por quatro dias. A seta indica o período de fim do estresse luminoso. Adaptado de Guinn (1974).

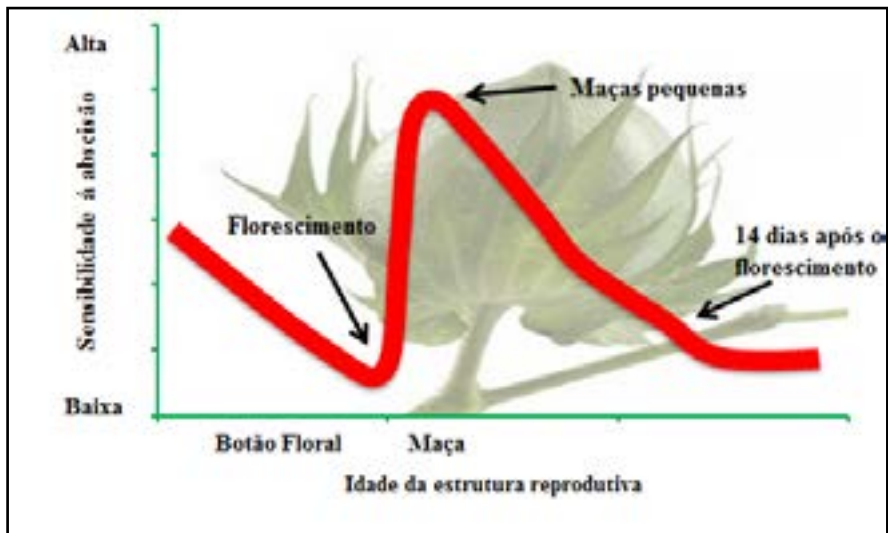


Figura 6. Sensibilidade à abscisão e os estádios de desenvolvimento do fruto do algodoeiro. Adaptado de Hake et al. (1989)

Sob condições edafoclimáticas de três regiões brasileiras, observou-se que a incidência da sombra em qualquer estágio fenológico reduziu o número de capulhos, sendo que o início do florescimento (F1) foi o que se mostrou mais sensível em Paranapanema-SP (ambiente safra), com redução de 15% no número de capulhos. O mesmo foi observado em Chapadão do Céu-GO (redução de 17% no número de capulhos), quando a semeadura foi realizada em ambiente de segunda safra. No entanto, em Primavera do Leste-MT, também em ambiente de segunda safra, a maior redução no número de capulhos ocorreu com a sombra em C3 (16,5%). A maior taxa de abscisão quando a sombra ocorre no florescimento deve-se à baixa produção de carboidratos, limitada pela menor taxa fotossintética (Zhao e Oosterhuis, 1998). Aliado a isso, como visto na *figura 6*, a susceptibilidade à queda das estruturas reprodutivas aumenta acentuadamente nesse período.

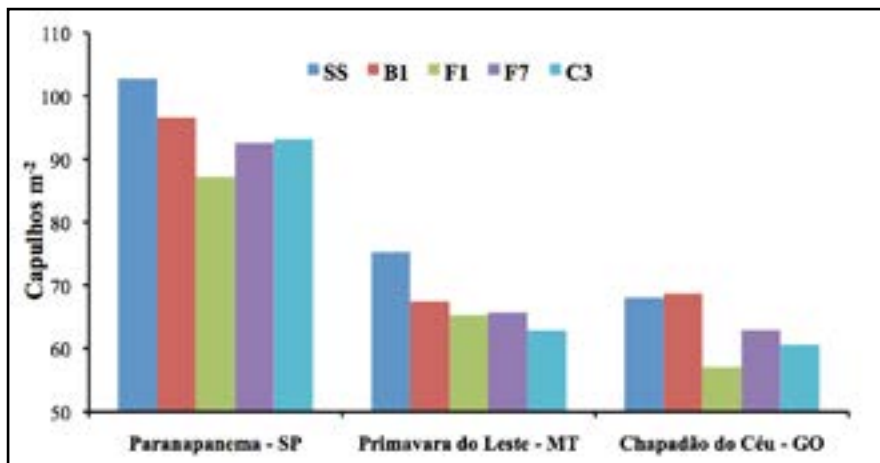


Gráfico 3. Número de capulhos em plantas submetidas ao estresse luminoso nos estádios B1 (primeiro botão floral), F1 (primeira flor no primeiro ramo frutífero); F7 (primeira flor no sétimo ramo frutífero) e C3 (primeiro capulho no terceiro ramo frutífero) e no tratamento SS (sem sombra - testemunha). A redução da luminosidade foi de 50% durante sete dias em Paranapanema e de dez dias em Primavera do Leste e Chapadão do Céu. As épocas de semeadura foram 25/11, 24/01 e 11/02 em Paranapanema, Primavera do Leste e Chapadão do Céu, respectivamente. Fonte: Echer (2012).

O sombreamento na fase C3 reduziu o peso do capulho em pelo menos dois dos três locais estudados (Paranapanema-SP e Primavera do Leste-MT), isso porque, no ambiente de segunda safra em Chapadão do Céu-GO, a restrição hídrica sobrepôs-se ao efeito do sombreamento (*tabela 1*). A redução do peso do capulho nos estádios fenológicos mais avançados ocorre em razão da menor deposição de celulose na parede secundária, o que tende a reduzir a qualidade da fibra, especialmente o índice micronaire (Zhao e Oosterhuis, 1998). A incidência da sombra em todos os estádios reduziu a produtividade de algodão em caroço, especialmente quando a redução da luminosidade ocorreu nas fases F1 (menor número de capulhos) e C3 (menor peso de capulho) (*tabela 1*).

Tabela 1. Efeito da época da sombra sobre o peso do capulho e produtividade de algodão em caroço em três ambientes, Paranapanema-SP, Primavera do Leste-MT e Chapadão do Céu-GO.

Época da Sombra #	Peso do capulho			Produtividade de algodão em caroço		
	Paranapanema	Primavera do Leste	Chapadão do Céu	Paranapanema	Primavera do Leste	Chapadão do Céu
	g			Kg ha ⁻¹		
SS	7,3 a	5,10 ab	5,08	4.575 a	2.521	2.698 a
B1	7,3 a	5,31 a	5,02	4.356 ab	2.289	2.049 bc
F1	7,3 a	5,32 a	4,78	4.130 b	2.235	1.949 c
F7	7,4 a	5,10 ab	5,03	4.288 ab	2.329	2.423 abc
C3	7,0 b	4,83 b	5,02	4.194 b	2.298	2.651 ab
DMS(P<FCa)	0,30(0,34)	0,32(0,33)	0,35(0,45)	290 (P<0,01)	418(0,68)	621(0,06)

#A redução da luminosidade foi de 50% durante sete dias em Paranapanema e de dez dias em Primavera do Leste e Chapadão do Céu.

Apesar da sombra ter afetado negativamente a produtividade, o efeito sobre a qualidade da fibra foi menos pronunciado, havendo uma tendência de redução do índice micronaire com a incidência da sombra no período de florescimento, mas sem efeito sobre o comprimento da fibra (*tabela 2*).

Tabela 2. Efeito da época da sombra sobre o índice micronaire e o comprimento da fibra do algodão em Paranapanema-SP, Primavera do Leste-MT e Chapadão do Céu-GO.

Época da Sombra*	Micronaire			Comprimento		
	Paranapanema	Primavera do Leste	Chapadão do Céu	Paranapanema	Primavera do Leste	Chapadão do Céu
	µg in ⁻¹			mm		
SS	4,26	3,12	3,81 b	28,14	28,54	25,97
B1	4,27	3,50	4,16 a	28,05	28,82	25,87
F1	4,13	3,37	3,82 b	28,18	28,70	25,94
F7	4,14	3,25	3,96 ab	28,34	28,70	26,16
C3	4,18	3,12	3,92 b	27,90	28,83	26,10
LSD(P<FCa)	0,15(0,33)	0,47(0,42)	0,21(0,01)	0,43(0,34)	0,49(0,75)	0,58(0,84)

*A redução da luminosidade foi de 50% durante sete dias em Paranapanema e de dez dias em Primavera do Leste e Chapadão do Céu. Fonte: Echer (2012).

2. Estratégias para conviver com o estresse luminoso

O estresse luminoso, como visto, resulta em perda de produtividade ou aumento no custo de produção. Isso varia de ano a ano, dependendo das condições climáticas, de modo que a previsão de ocorrência de prejuízo é muito difícil.

Uma boa previsão de clima, associada ao planejamento adequado das épocas de semeadura e distribuição de variedades, pode ajudar na minimização das perdas. Em regiões onde é possível a irrigação, o planejamento é facilitado, uma vez que fica eliminada a restrição hídrica, que interage fortemente com a quantidade de energia disponível para fotossíntese. Na segunda parte deste capítulo, serão apresentadas outras possibilidades de manejo para melhorar o aproveitamento da luminosidade disponível.

Referências bibliográficas

ECHER, F. R. Respostas fisiológicas e fitotécnicas do algodoeiro à luminosidade e à elevada temperatura noturna. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista: Botucatu, 2012. 127f.

ECHER, F. R.; ROSOLEM, C. A. Physiological responses of cotton plants to light and leaf aging. **Biologia Plantarum**. No prelo, 2013.

FIETZ, C. R.; COMUNELLO, E.; CREMON, C.; DALLACORT, R. **Estimativa da precipitação provável para o Estado de Mato Grosso**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 237p.

GUINN, G. Abscission of cotton floral buds and bolls as influenced by factors affecting photosynthesis and respiration. **Crop Sci**. 14:291-293. 1974.

HAKE, K., GUINN, G., OOSTERHUIS, D. Environmental causes of shed. *Physiology Today*. Tech. Services. National Cotton Council, Memphis, Tennessee. Dec. 1989.

HEARN, A. B. Crop physiology. In: ARNOLD, M. H. (Ed.). **Agricultural research for development: the Namulonge contribution**. London: Cambridge University Press, 1976.

KRIEG, D. R. Leaf age-gas exchange characteristics. In: Beltwide Cotton Production Research Conferences, 1988, New Orleans. **Proceedings...** p. 55-57. New Orleans: National Cotton Council, 1988.

LANDIVAR, J. A.; REDDY, K. R.; HODGES, H. F. Physiological simulation of cotton growth and yield. In: STEWART, J.; OOSTERHUIS, D.; HEITHOLT, J. J.;

MAUNEY, J. Editors. Physiology of cotton. 563p. New York, 2010.

MALKIN, R.; NIYOGI, K. PHOTOSYNTHESIS. IN: BUCHANAN, B. B.; GRUISEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and molecular biology of plants**. p. 568-628. Eds. American Society of Plant Physiologists: Rockville, 2000.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, 9, 747-766. 1972.

ROOM, P. M.; HANAN, J. S. Virtual cotton: a new tool for research, management and training. **Proceedings of the World Cotton Research Conference-1: Challenging the Future**, Brisbane, Australia, February 14-17, 1994. Editors: G.A. Constable and N.W. Forrester. Pages 40-44. CSIRO Australia. 1995.

SASSENATH-COLE, G. F.; G. LU; H .F. HODGES; MCKINION, J. M. Photon flux density versus leaf senescence in determining photosynthetic efficiency and capacity of *Gossypium hirsutum* L. leaves. *Environ. Exp. Bot.*36:439-446. 1996.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 5th. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2010. 782 p.

THAYER, S. S. et al. Protein turnover during senescence. In: Thomson, W. W.; Nothnagel, E.A.; Huffaker, R. C. (Ed.). **Plant senescence: its biochemistry and physiology**. p. 71-80. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1987.

WOOLHOUSE, H. W. Regulation of senescence in the chloroplast. In: THOMSON, W. W.; NOTHNAGEL, E. A.; HUFFAKER, R. C. (Ed.). **Plant senescence: its biochemistry and physiology**. p. 132-145. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1987.

WULLSCHLEGER S. D.; OOSTERHUIS, D. M. Photosynthesis of individual field-grown cotton leaves during ontogeny. **Photosynthesis Research**, Amsterdam, v. 23, p. 23, 163-170, 1990a.

WULLSCHLEGER, S. D.; OOSTERHUIS, D. M. Photosynthetic and respiratory activity of fruiting forms within the cotton canopy. **Plant Physiology**, Sunderland, v. 94, n. 2, p. 463-469, 1990b.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M. Cotton responses to shade at different growth stages: nonstructural carbohydrate composition. **Crop Science**, Madison, v. 38, p. 1196-1203, 1998.

Estratégias para melhorar o aproveitamento da luminosidade na cultura do algodão

Ederaldo J. Chiavegato

ESALQ/USP

Marcos S. Bernardes

ESALQ/USP

Henrique Da Ros Carvalho

Texas A&M

As plantas devem ser encaradas como transformadoras primárias de energia solar por meio da fotossíntese, sendo sua eficiência fator determinante da produtividade agrícola, em termos de conversão da energia solar ou em fitomassa total ou em produtos úteis.

Os fatores que influenciam a produtividade agrícola podem ser divididos esquematicamente em três categorias que refletem distintas situações de produção (*figura 1*). Quando a lavoura é bem suprida de água e nutrientes e está livre de pragas, doenças e plantas daninhas, ela encontra-se na situação de produção 1, chamada de produtividade potencial, sendo determinada pelo estado das plantas e pelas condições de radiação, temperatura e CO₂; quando passa por períodos de escassez de água (2a) ou nutrientes (2b) em algum momento do seu ciclo, a lavoura passa para a situação de produção 2, chamada de produtividade atingível; quando sofre pela ocorrência de pragas, doenças, plantas daninhas e agentes poluentes, a situação de produção é reduzida a situação 3, que leva o nome de produtividade real, e representa a grande maioria dos sistemas de produção agrícola do mundo (Lövenstein et al., 1995).

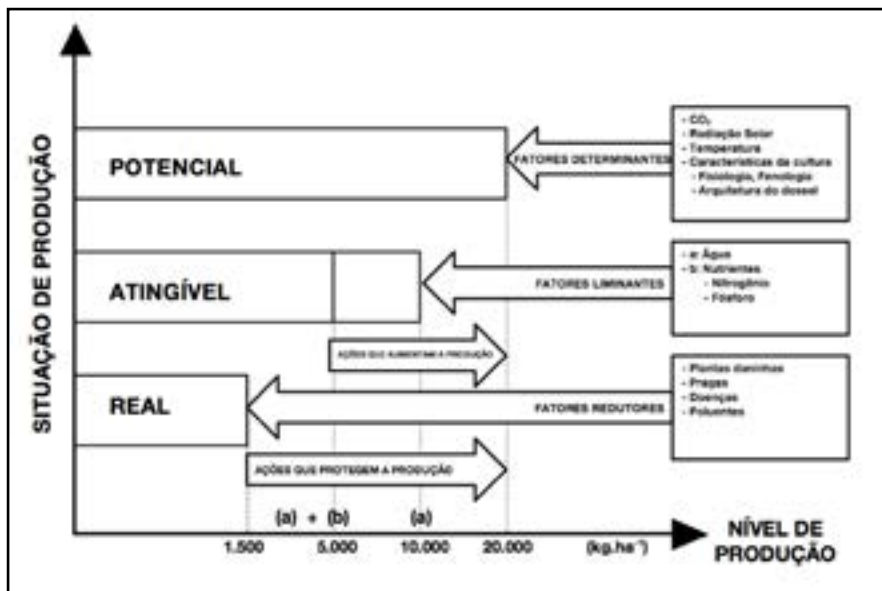


Figura 1. Visão esquemática dos níveis de produtividade. Adaptado de Lövenstein et al, 1995.

Porém, a relação entre fotossíntese e produtividade é muito complexa. A inexistência de uma relação sempre direta entre elas é provavelmente explicada não apenas pela dependência da produtividade das culturas em relação à taxa fotossintética das folhas, mas também pela dimensão da área foliar, duração do período vegetativo, arquitetura da copa, respiração, translocação e partição de assimilados, entre outros aspectos. Ou seja, a produtividade da planta é resultado de processos e de reações complexas e diversas que ocorrem na ontogênese e nos indivíduos maduros sob influência das condições externas (Nasyrov, 1978). Portanto, a produtividade final da cultura depende de alguns fatores: a) quantidade de energia incidente; b) quantidade de energia interceptada e absorvida (excitação eletrônica); c) quantidade de energia transportada para as partes úteis da planta (partição de assimilados); d) metabolismo nas partes úteis da planta (eficiência na utilização).

O primeiro fator depende quase que exclusivamente das condições de insolação, e os demais fatores podem ser manipulados geneticamente e por meio de manejo cultural.

Em resumo, muitos fatores estão envolvidos na determinação da produtividade agrícola, sendo a fotossíntese um dos mais importantes. A formação do dossel e sua influência sobre a fotossíntese e a produtividade das plantas estão principalmente relacionadas com a quantidade e qualidade da energia incidente, interceptada e absorvida.

As formas pelas quais é possível interferir na fotossíntese visando incrementos na produtividade compreendem a manipulação ambiental, genéti-

ca e cultural. Serão abordadas neste texto as particularidades morfológicas do algodoeiro no que se refere a sua arquitetura foliar e de quais formas o arranjo de plantas, o ajuste na época de sementeira e a escolha da cultivar podem aumentar o aproveitamento da luz disponível, visando a melhoria da eficiência fotossintética e o incremento da produtividade do algodoeiro.

1. Arquitetura foliar

O algodoeiro é uma planta heliotrópica, ou seja, suas folhas movimentam-se para acompanhar o deslocamento do sol ao longo do dia (*figura 2*). Esse movimento caracteriza-se por um ângulo de 90° à luz incidente, maximizando, portanto, a quantidade de luz disponível para a fotossíntese. Esse movimento é reversível, pois se trata de um movimento de turgor (Wells, 2011). Tal particularidade evidencia a grande dependência do algodoeiro da luminosidade, subentendendo-se, portanto, que o autossombreamento pode ser muito prejudicial à planta. No entanto, ao longo de sua evolução, a espécie desenvolveu naturalmente mecanismos para atenuá-lo.



Figura 2. Movimento heliotrópico de folhas do algodoeiro para acompanhar a luminosidade do final da tarde. Piracicaba, 2012. (H. D. R. Carvalho & E. J. Chiavegato)

No que se refere ao aparato foliar, algumas considerações precisam ser feitas. Primeiramente, é preciso entender que a área foliar do algodoeiro é constituída de folhas cuja inserção encontra-se na haste principal e nos ramos reprodutivos (*figura 3A*). Além de serem alternadas, as folhas da haste principal apresentam índice filotáxico de $2/5$, ou seja, contam-se cinco folhas, dando duas voltas na haste, até chegar novamente à mesma vertical. De fato, a distribuição espiralada das folhas e ramos em torno da haste principal, evitando a sobreposição destas, é um mecanismo importante para atenuar o autossombreamento, como ilustrado pela *figura 3B* a partir de uma visão de um plano superior de uma planta isolada de algodoeiro.



Figura 3. (A) Morfologia de um ramo reprodutivo do algodoeiro. (B) Plano superior de uma planta isolada de algodoeiro (E. J. Chiavegato).

Outro ponto importante a ser considerado é em que estrato da planta encontram-se essas folhas. Sistemáticamente, observa-se que, em um mesmo nó, as folhas dos ramos reprodutivos possuem, geralmente, metade ou menos da área foliar da folha da haste principal, enquanto que as folhas produzidas nas regiões inferior e central são maiores que as da parte superior da planta. Folhas novas aparecem de acordo com um intervalo médio de três dias, e cada folha demora por volta de 18 dias para atingir seu tamanho máximo. Por fim, no momento em que uma folha da haste atinge seu tamanho máximo, é possível encontrar seis novas folhas acima desta, capazes de interceptar 25% da radiação solar incidente, causando, portanto, um aumento significativo no grau de sombreamento (Constable e Oosterhuis, 2010).

Situação parecida pode ser observada na figura 4. Por ocasião do aparecimento da primeira flor na planta, mais da metade da luz incidente fica retida nos três primeiros ramos da planta, de modo que somente 11% da luz incidente é capaz de chegar à altura da folha correspondente à flor branca, ameaçando, portanto, a retenção dessa estrutura; 20 dias após o aparecimento da primeira flor, somente 6% da luz incide sobre essa mesma folha e 40 dias após, a maçã já se encontra na fase inicial de desenvolvimento. Na fase inicial de desenvolvimento das fibras, a maçã demanda uma grande quantidade de energia que não consegue ser suprida pela sua respectiva folha, podendo fazer com que a planta remobilize suas reservas para atendê-la, muitas vezes em detrimento do seu crescimento vegetativo, antecipando consequentemente o corte fisiológico (“cut-out”) (Hake et al., 1991b).

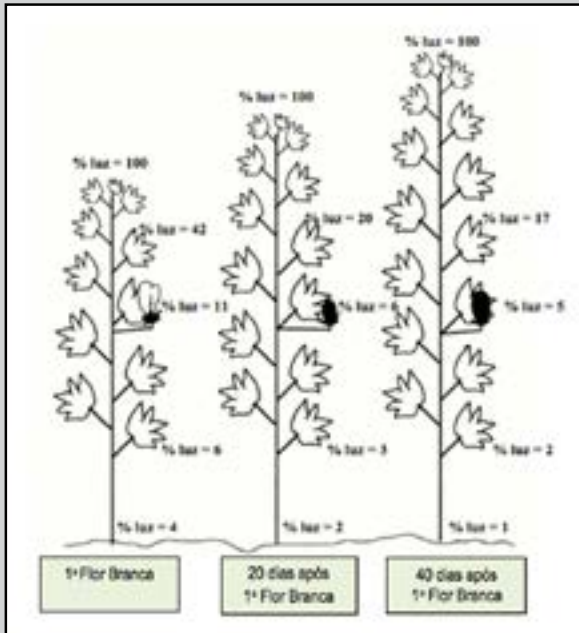


Figura 4. Quantidade de luz transmitida em diferentes profundidades do dossel do algodoeiro em momentos distintos. Adaptado de Hake et al. (1991b).

A interceptação e penetração de luz no dossel da cultura é um assunto que merece especial atenção. A priori, entende-se que o tamanho das folhas, seu arranjo e angulação, bem como a densidade de plantas e espaçamento entrelinhas, influenciam de maneira determinante na quantidade de luz aproveitada pelas culturas (Constable e Oosterhuis, 2010).

Saeki (1963) define essas relações pela seguinte equação:

$$I/I_0 = \exp(-k * IAF) \quad (1)$$

onde I é a quantidade de luz que chega ao solo; I_0 é a quantidade de luz incidente acima do dossel da cultura; IAF é o índice de área foliar, que é uma expressão da densidade populacional, dado pela área foliar existente em relação à superfície do solo (m^2 folhas/ m^2 de área do solo); k é o coeficiente de extinção de luz, que corresponde ao ângulo entre as folhas e o sol. De uma maneira geral, quanto menor o valor de k , mais eretas são as folhas, e quanto maior o valor de k , mais planófilas.

Porém, é importante ressaltar que a produção fotossintética não aumenta indefinidamente com o IAF , sendo limitada pelo autossombreamento que as folhas superiores exercem sobre as inferiores. Alguns autores consideram que o valor ótimo de IAF é aquele que proporcione aproximadamente 95% de interceptação de luz (Loomis e Williams, 1969; Mitchell, 1979). A partir disso, é possível intuir da equação (1) que, para um mesmo valor de interceptação de luz (I/I_0), menor k implica IAF maior, enquanto que

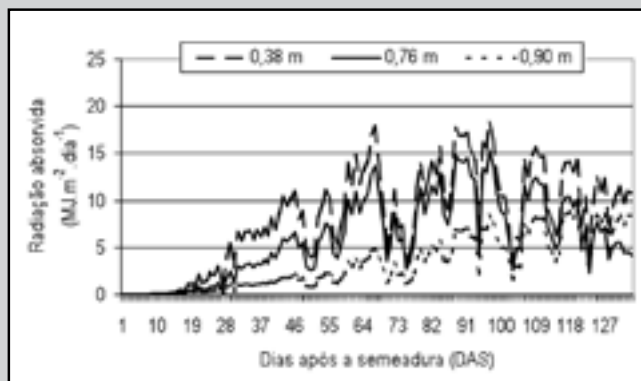
maior k proporciona IAF menor. De fato, Constable e Oosterhuis (2010) relatam que foram encontrados valores de k da ordem de 0,5 a 1 para o algodoeiro, e que quando a cultura apresenta IAF de 3, cerca de 95% da luz incidente é interceptada pelas plantas.

Em função de sua estrutura de dossel planofilar (valor de k elevado), a planta de algodão é intrinsecamente ineficiente quanto à interceptação e distribuição da luz, pois prioriza a captura de energia pelas folhas superiores, restando pouca para as folhas do interior da copa e para as dos estratos inferiores do dossel (Beltrão e Azevedo, 1993). Esses autores citam Kasanaga e Monsi (1954) para explicar que a baixa transmissibilidade da folha do algodoeiro à luz (menos de 10%) é o fator responsável pela redução da fotossíntese em regiões sombreadas. Consequentemente, as folhas sombreadas envelhecem prematuramente e perdem sua habilidade de produzir carboidratos, favorecendo, portanto, o abortamento de estruturas reprodutivas (Hake et al, 1991b).

Em termos de aproveitamento de luz pela planta de algodão, é possível afirmar a existência de uma situação desejável, de boa interceptação e penetração da luminosidade, e outra indesejável, de excessivo autossombreamento. O desafio reside na busca pelo equilíbrio entre a capacidade de interceptação de luz pelo dossel, aumento da penetração de luz para as folhas sombreadas e maior aeração da porção inferior da planta (Cothren, 1994). Portanto, vê-se que a situação desejável só pode ser obtida por meio da integração de ajustes específicos no arranjo de plantas, época de semeadura, cultivares e com práticas culturais de manejo (regulador de crescimento, nutrientes – N, controle de pragas x retenção de estruturas) que tenham como objetivo adequar a arquitetura e porte das plantas ao espaço por elas ocupado.

De fato, para uma mesma cultivar e mesma época de semeadura, variações no espaçamento entrelinhas alteram consideravelmente a radiação absorvida (*figura 5*) e transmitida (*figura 6*) pela cultura do algodoeiro a partir do estágio fenológico B1 (1º botão floral) quando tem início a diferenciação entre o desenvolvimento vegetativo e o desenvolvimento reprodutivo.

Figura 5. Radiação absorvida ($\text{MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$) na cultura do algodoeiro nos espaçamentos entrelinhas de 0,38, 0,76 e 0,90 m. Piracicaba, 2003/2004 (Silva et al., 2005).



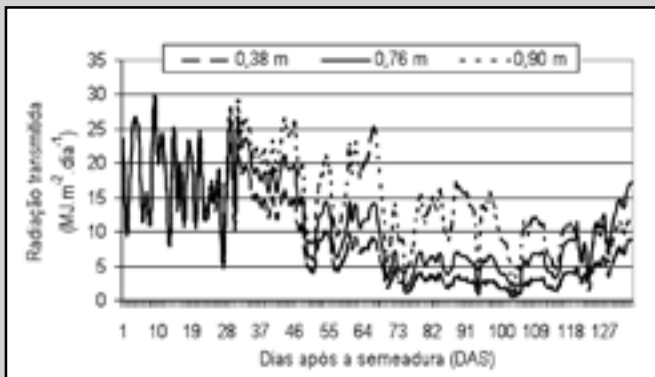


Figura 6. Radiação transmitida ($\text{MJ.m}^2.\text{dia}^{-1}$) na cultura do algodoeiro nos espaçamentos entrelinhas de 0,38, 0,76 e 0,90 m. Piracicaba, 2003/2004 (Silva et al., 2005).

Considerando que o valor de IAF = 3,0 é o ideal para o algodoeiro, independentemente da população de plantas na área, uma maneira prática de estimar esse valor na lavoura é quando as folhas do terço médio das plantas se encontram no meio das entrelinhas, com o ponteiro destacando-se em forma piramidal, conforme a *figura 7*.



Figura 7. Estrutura piramidal do algodoeiro com IAF = 3,0 no pico do florescimento. (E.J. Chiavegato)

2. Arranjo de plantas: população, densidade e espaçamento

O arranjo de plantas é em função da população (número de indivíduos por unidade de área), densidade (número de plantas por metro) e espaçamento (distância entre duas fileiras consecutivas de plantas), determinando a área disponível ao crescimento e desenvolvimento de cada planta. Sendo, portanto, a população ideal de plantas aquela que promove a máxima utilização dos recursos disponíveis no meio, com a mínima competição intraes-

pecífica. Assim, determinar a população ideal de plantas exige estudos direcionados a cada grupo de ambiente, cultivar e manejo utilizado (Chiavegato et al., 2010).

As respostas, em produtividade, à densidade populacional, dependem do fato de o produto agrícola ser resultado do crescimento vegetativo ou do crescimento reprodutivo da planta. Isto porque, o crescimento vegetativo está ligado à acumulação de matéria seca, que responde em curva assintótica ao aumento da densidade, sem decréscimo em altas densidades. Essa acumulação de matéria seca total da planta, ou da sua parte aérea, é chamada de produção biológica. Já o crescimento reprodutivo, como de sementes e frutos, em alguns casos chamado de produção econômica, responde de forma parabólica, com um pico de máxima produção seguido de declínio (*figura 8*). No caso do algodoeiro, a demanda por assimilados pelas estruturas reprodutivas cresce de maneira exponencial; a capacidade de suprimento aumenta de maneira assintótica (Hearn, 1995). O resultado disso é o aumento contínuo na demanda por assimilados pelos frutos e uma lenta e eventual interrupção do desenvolvimento vegetativo (Wells e Stewart, 2010).

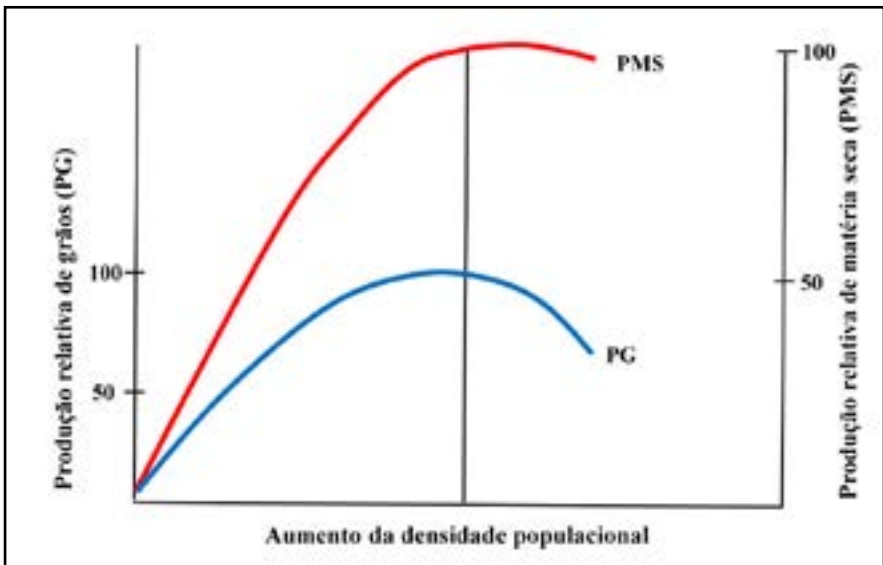


Figura 8. Efeito do aumento da densidade populacional na produção de grãos (PG) e na produção de matéria seca (PMS) das culturas (Adaptado de Mitchell, 1979).

Maior uniformidade das plantas em uma população permite maiores densidades, sem ocorrência de grande número de plantas suprimidas pela competição.

A interação entre as plantas de uma cultura ocorre de duas formas:

a) a competição por luz instala-se rapidamente: é o caso das culturas anuais como o algodoeiro. Neste caso, o que se deseja é o rápido crescimento da área foliar e uma arquitetura foliar que reduza ao máximo o autossombreamento;

b) a competição por luz instala-se lentamente: é o caso das culturas perenes e de ciclo mais longo. Nesta situação, é desejável um aumento do IAF, que pode ser obtido por manipulação da arquitetura da copa ou pelo aumento da densidade associada a desbaste posterior.

Quando se considera o crescimento individual das plantas, verifica-se que o acúmulo de massa seca diminui com o aumento da densidade de plantio. Assim, ocorre um efeito de compensação no sentido de uniformizar, dentro de certos limites, a produtividade biológica e econômica por unidade de área, o que pode ser observado em plantas anuais ou perenes. Esse efeito de compensação ocorre até uma densidade ótima para a máxima produtividade biológica ou econômica, que precisa ser determinada teórica ou empiricamente. Em condições como no caso da semeadura do algodoeiro no final do verão, as restrições ao crescimento individual impedem que ocorra essa compensação. Assim, plantas mais espaçadas apresentam crescimento individual similar ao das adensadas, e, nesse caso, a produtividade biológica por área cultivada decresce nas menores densidades de plantio.

Em situações em que a radiação difusa torna-se proporcionalmente mais importante que a radiação direta, maiores densidades populacionais, ou lavouras com IAF mais elevado, são favorecidas.

Alguns aspectos secundários podem ser afetados pela mudança de densidade de plantas de uma cultura, tais como: a) incidência de predadores e de parasitas: normalmente aumenta com o aumento da densidade; b) incidência de plantas daninhas: diminui com o aumento da densidade (Mitchell, 1979).

O algodoeiro apresenta uma grande plasticidade no que se refere a sua habilidade de ocupação do espaço. Portanto, é possível deduzir que a lavoura de algodão pode ser conduzida de maneira satisfatória em diferentes configurações. Isso se deve à capacidade de compensar o padrão de frutificação em resposta às diferentes densidades populacionais (Silvertooth et al., 1999). No entanto, como regra geral, tanto populações muito elevadas quanto muito baixas são indesejáveis.

Em populações elevadas, há aumento do autossombreamento dentro do dossel, o que acarreta aumento na taxa de abscisão de estruturas reprodutivas, desenvolvimento lento daquelas estruturas que foram retidas e ainda impactos negativos no desenvolvimento das fibras, resultando geralmente em baixos índices de micronaire (Silvertooth et al., 1999).

Altas populações de plantas predisõem o autossombreamento, causando o abortamento de estruturas reprodutivas e prejudicando, sobretudo, o índice micronaire e a maturidade das fibras nas estruturas retidas. Além disso, altas densidades de plantas aumentam também as dificuldades no controle fitossanitário e deslocam a carga para o ápice, inclusive com a pos-

sibilidade de causar acamamento das plantas. Contrariamente, em baixas densidade populacionais, o desafio é no sentido de estimular o desenvolvimento da parte aérea e tentar mitigar os possíveis estresses, principalmente os de ordem nutricional e hídrica, uma vez que a quantidade de luz, nesse caso, não é limitante (Hake et al., 1991a).

Quanto às baixas populações, o problema deve-se à produção de uma quantidade insuficiente de frutos por unidade de área, além de favorecer a competição interespecífica com plantas daninhas. Isso resulta do fato de que, a partir de um ponto crítico, mesmo com o aumento do porte da planta, ela não consegue compensar a baixa população (Silvertooth et al., 1999; Wells e Stewart, 2010).

Do ponto de vista agrônômico, a população ideal de plantas é aquela que proporciona maior produção por unidade de área, com garantia na qualidade da fibra, conciliada com os fatores que influenciam na sua definição, tais como: época de semeadura, cultivar, clima, tempo, fertilidade do solo, sistemas de cultivo e tipos de colheita, ou seja, o ambiente de produção (Chiavegato et al., 2010).

Considerando o ambiente de produção em termos de aproveitamento do espaço pelas plantas de algodão, o primeiro ponto a ser trabalhado é a densidade de plantas. Essa deve ser mantida entre 8 e 10 plantas/metro linear, independentemente do espaçamento adotado, porém o mais importante é a distribuição uniforme de plantas na linha de semeadura, proporcionando, conseqüentemente, melhor distribuição dos frutos nas plantas.

Quanto ao espaçamento entrelinhas, os mais convenientes são aqueles que correspondem a cerca de 2/3 da altura final das plantas (Righi et al., 1965). Ou seja, a altura final desejada deve ser 33% superior ao espaçamento adotado. A partir dessa observação, foram derivados os espaçamentos empregados na cotonicultura. Recomenda-se para o início da “janela” de semeadura a adoção de espaçamentos entre fileiras maiores (0,76 a 0,90 m), e, à medida que se avança no tempo, deve-se optar por espaçamentos mais estreitos (0,45 a 0,50 m).

3. Épocas de semeadura

A definição das épocas de semeadura tem por objetivo estabelecer os períodos mais convenientes para a utilização econômica de uma cultura, visando propiciar condições ambientais favoráveis às cultivares, para que possam expressar seu potencial genético em termos de produtividade e qualidade (Neto et al., 2001). Dessa maneira, as influências desfavoráveis são atenuadas, e as favoráveis, melhor aproveitadas; a produtividade corre menos riscos, mantendo-se em níveis quase sempre compensadores, sem prejuízos quantitativos ou qualitativos (Righi et al., 1965).

Quanto à disponibilidade de radiação solar em diferentes épocas do ano, é preciso considerar alguns pontos. Primeiramente, a quantidade de energia da qual dispomos é, a priori, em função da distância e da angulação da

Terra em relação ao Sol e dos movimentos do planeta em torno de seu próprio eixo (rotação) e em torno do Sol (translação).

No entanto, esse caminhar (translação) não possui uma forma circular, mas, sim, a de uma elipse. Isso sugere que, ao longo de seu movimento de translação, a Terra encontra-se ora mais próxima, ora mais afastada do Sol. No hemisfério sul, durante o verão, a Terra encontra-se mais próxima do Sol, enquanto que durante inverno, encontra-se mais longe.

Entre o plano equatorial terrestre e o plano que liga o centro da Terra ao Sol, forma-se um ângulo, chamado de ângulo de declinação solar (δ), que varia ao longo do ano entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$. Durante o verão, o hemisfério sul apresenta δ máximo de $-23,45^\circ$. Isso significa que o intervalo entre o nascer e o pôr do Sol (fotoperíodo) é superior a 12 horas. Durante o inverno, ocorre o inverso, e o fotoperíodo é inferior a 12 horas (Pereira et al., 2007).

Obviamente, a partir dessas considerações é possível deduzir que, durante o verão, há maior disponibilidade de radiação solar que no inverno.

Logo, no que diz respeito à “janela” de semeadura da cultura do algodão e a sua relação com a disponibilidade de energia, verifica-se que o algodão safrá (semeado nas primeiras épocas) dispõe de mais energia luminosa que as lavouras tardias, ou safrinha.

Baseia-se nessa lógica a recomendação de espaçamentos maiores nas primeiras épocas e mais estreitos nas tardias. Entende-se que, dispondo de mais energia, deve-se fornecer mais espaço à planta, estimulando-a a produzir uma grande quantidade de frutos por indivíduo. Em épocas tardias (menor quantidade de energia disponível), deve-se diminuir o espaço, diminuindo a quantidade de frutos por indivíduo, mas garantindo a mesma quantidade de frutos por unidade de área que nos espaçamentos maiores, mantendo o nível de produtividade da cultura.

4. Cultivares

Wells e Meredith (1984a, 1984b, 1984c) estudaram as diferenças entre cultivares antigas e modernas (com características semelhantes às disponíveis em nosso meio). Nesses estudos, ressaltaram que as cultivares modernas possuem dosséis menores (mais compactos) que seus ancestrais; fazem uma transição mais precoce e completa da partição de assimilados da fase vegetativa para a reprodutiva (indício de que não houve melhoria na atividade assimilatória); têm uma grande porção de seu desenvolvimento reprodutivo numa fase em que há máximo IAF e possuem maçãs menores com maior porcentagem de fibra. Wells e Stewart (2010) explicam que as cultivares modernas mantêm uma relação de matéria seca reprodutiva para matéria seca vegetativa maior durante o desenvolvimento reprodutivo. Por fim, argumentam que dosséis maiores que o requerido para a máxima interceptação de luz representam um mau dispêndio de recursos, uma vez que o objetivo é o aumento da produção de fibras. Thompson (1999) relata que as cultivares modernas são mais precoces e possuem maior índice de colheita que as antigas. Lembrando que o ín-

dice de colheita ($IC = \text{biomassa útil} / \text{biomassa total}$) decresce com o aumento da população, em virtude de adaptações morfológicas (fotomorfogênese) das plantas (Pereira, 1989). Ou seja, sob forte condição de competição por luz ou sombreamento excessivo, o IC é conseqüentemente reduzido.

Tendo como base as conclusões desses autores, é possível inferir que os trabalhos de melhoramento genético ainda não são dirigidos para a melhoria da eficiência fotossintética. Essa é, portanto, uma área passível de ser explorada em trabalhos futuros.

De uma maneira geral, considerando-se a disponibilidade de energia, recomenda-se o emprego de cultivares de ciclo tardio para as primeiras épocas e de ciclo precoce para as épocas tardias. Quanto à ocupação do espaço, são desejáveis cultivares com arquitetura piramidal em espaçamentos entre fileiras maiores e cultivares de arquitetura cilíndrica (“cluster”) em espaçamentos mais adensados.

Porém, com a recente introdução e predomínio de cultivares transgênicas com tolerância a lepidópteros, nas safras atuais e futuras e em todas as regiões produtoras de algodão no Brasil, ajustes no manejo serão necessários, tais como:

- A melhor preservação da integridade das folhas (menor porcentagem de desfolha) e a proteção das estruturas reprodutivas face à maior eficácia no controle das lagartas, alterações significativas ocorrerão na área foliar e na dinâmica de frutificação; tais ocorrências requererão ajustes — sobretudo nas épocas de semeadura, população de plantas, bem como no uso de reguladores de crescimento e nutrição mineral (doses, épocas e modos de aplicação) — serão fundamentais para garantia da produção e qualidade das fibras. Tais ajustes têm como meta adequar esses materiais no que se refere ao melhor aproveitamento dos principais elementos climáticos (radiação solar, precipitação pluvial, umidade relativa, temperatura). Assim sendo, algumas considerações práticas para os ajustes requeridos no manejo da cultura devem ser observados.
- A maior preservação da área foliar (melhor controle das lagartas desfolhadoras) pode, em princípio, favorecer a captação de energia e a eficiência fotossintética. Porém, contrariamente, a alta densidade foliar (alto IAF) pode também favorecer o autossombreamento e o aumento da umidade relativa no dossel, principalmente nas épocas de maior concentração das chuvas e tempos nublados, podendo reduzir a atividade fotossintética e a partição de assimilados. Assim, admitindo a possibilidade de um aparato foliar mais íntegro e preservado, conseqüentemente mais denso, o IAF ideal deve ser atingido com ajustes na população de plantas. Altas populações são eventualmente indesejáveis, pois podem acentuar o autossombreamento e, como é sabido, com o aumento da umidade relativa do dossel (*figura 9*), há predisposição à ocorrência de doenças (*figura 10*) e ainda ao apodrecimento das maçãs nos estratos inferiores das plantas.

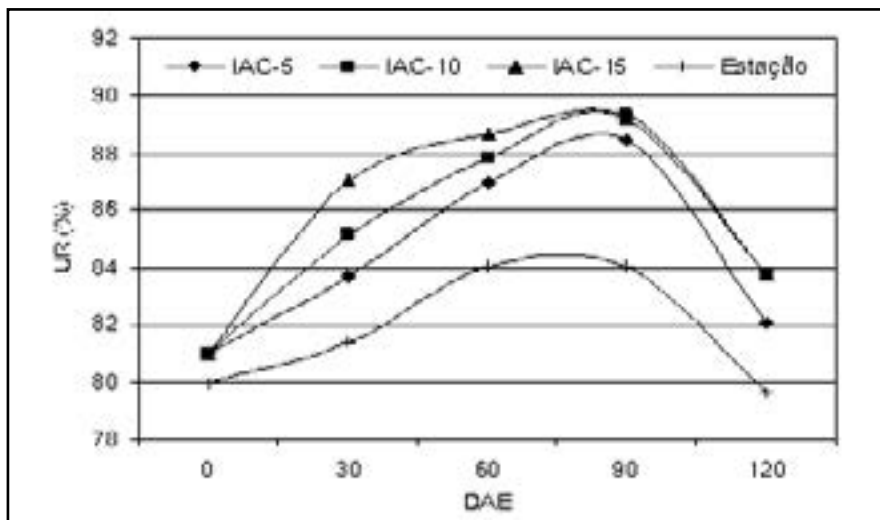


Figura 9. Umidade relativa UR (%) no dossel da cultura do algodoeiro e na estação geral em dias após emergência (DAE). (Monteiro et al., 2003)

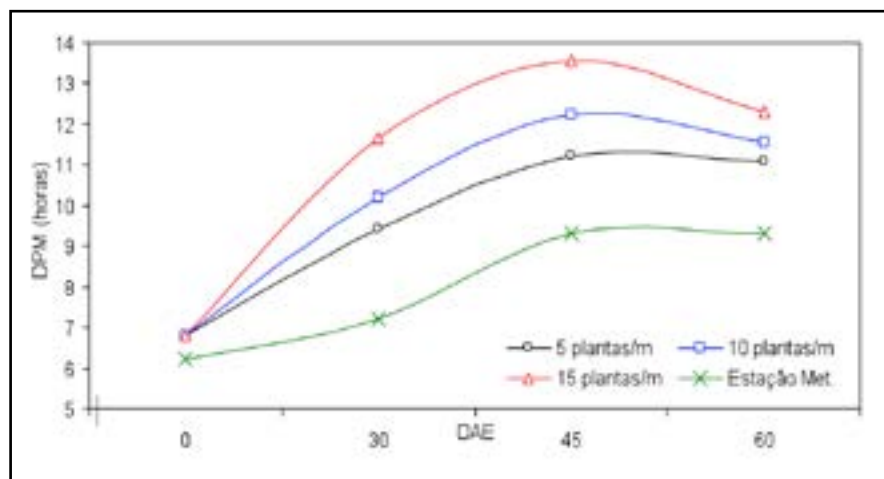


Figura 10. Duração média do período de molhamento, entre 0 e 60 DAE, em três densidades de semeadura no espaçamento de 0,90 m e na estação meteorológica. A linha pontilhada indica o período mínimo hipotético de molhamento necessário (12 h) para ocorrência de infecção entre 22°C e 24°C. (Monteiro et al., 2003)

Com respeito à dinâmica de frutificação nas cultivares transgênicas, observações práticas têm evidenciado maior retenção de estruturas frutíferas devido à maior eficácia no controle de lagartas nesses materiais. Na *figura 11*, comparando-se a dinâmica de frutificação entre cultivares (convencional e transgênico - Bt), nota-se maior retenção das primeiras maçãs nos estratos inferiores e mediano das plantas, podendo, conseqüentemente, haver antecipação do ciclo de maturação (antecipação do “cut-out”). Ou seja, a maior retenção de frutos na planta intensifica a relação fonte x dreno e, conseqüentemente, o esgotamento antecipado dos nutrientes e assimilados no final do ciclo da cultura, podendo com isso comprometer a retenção e o desenvolvimento dos frutos do ponteiro. Assim, considerando o ciclo de maturação das cultivares (precoce, médio e tardio) e sua arquitetura (piramidal, cilíndrica - “cluster”) às épocas de semeadura, população de plantas e o uso de reguladores de crescimento, ajustes são imprescindíveis para o adequado aproveitamento da luminosidade disponível e da umidade relativa no dossel. Plantios antecipados (abertura de plantio) e lavouras com alto enfolhamento podem também, como já comentado, favorecer o apodrecimento dos frutos nas épocas com maiores índices pluviométricos e longos períodos nublados. O uso excessivo de regulador de crescimento também pode favorecer a antecipação do ciclo da cultura, já que a alta retenção de frutos na planta é o regulador natural mais importante do equilíbrio entre crescimento e desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

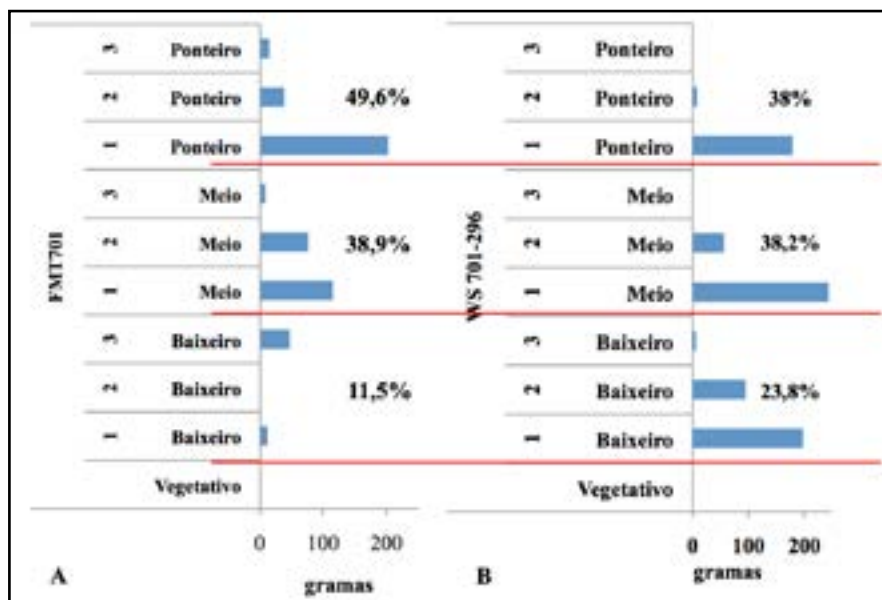


Figura 11. Distribuição dos frutos em plantas de algodão (A) Cultivar FMT701 - convencional (B) Cultivar WS 701-296 - transgênica com tolerância a lepidópteros. Adaptado de Kawakami, 2013.

5. Manejo da arquitetura foliar por meio de reguladores de crescimento

É sempre válido ressaltar que a complexidade do manejo do algodoeiro resulta do fato de ele ser biologicamente um arbusto semiperene de hábito indeterminado (padrão de desenvolvimento de ramos frutíferos e florescimento peculiar), cuja evolução adaptou-o para viver isolado e não em comunidade, como se verifica em uma lavoura (Constable e Oosterhuis, 2010). Consequentemente, a sistematização do desenvolvimento da espécie é relativamente difícil, já que a transição entre os processos de desenvolvimento (estabelecimento da planta e das raízes, área foliar e estabelecimento do dossel, florescimento e maturação) não são claramente distinguíveis.

Logo, é considerável o efeito que o ambiente — definido como o conjunto indiscriminado de condições e fatores, favoráveis ou adversos, presentes no local de cultivo — exerce sobre o crescimento e o desenvolvimento da planta, assim como sobre os componentes da produção (peso de capulhos, peso de sementes e rendimento de fibras) e a qualidade da fibra.

Portanto, uma lavoura de algodão bem manejada é aquela em que há equilíbrio entre o crescimento vegetativo e o desenvolvimento reprodutivo das plantas até o final do ciclo da cultura. Quando há excesso de crescimento vegetativo, a maturação dos frutos é retardada, e os problemas com pragas, doenças e o apodrecimento de maçãs tornam-se mais severos. No entanto, o excesso de frutificação também pode ser indesejável, pois atua de modo a antecipar o ciclo da cultura, diminuindo, consequentemente, a produção (menor peso dos capulhos) e a qualidade da fibra (fibras imaturas). Assim, uma lavoura com altos níveis de produtividade e qualidade de fibras é aquela que é conduzida ao “cut-out” pela interação de técnicas de manejo que proporcionem melhor aproveitamento das variáveis do ambiente, das quais os reguladores de crescimento são ferramentas imprescindíveis.

Nesse sentido, os reguladores de crescimento são amplamente utilizados para adequar a altura e, principalmente, a arquitetura das plantas ao espaçamento e à densidade de plantas na área, como condicionador para o melhor aproveitamento das plantas quanto aos elementos climáticos, sobretudo a energia disponível.

Os reguladores ou retardadores de crescimento são compostos de natureza sintética e, ao serem aplicados nas plantas, atuam de modo a retardar a elongação e a divisão celular.

No caso da cultura do algodoeiro, são amplamente empregados produtos à base de cloreto de mepiquat e cloreto de cloromequat. Esses compostos são responsáveis por inibir a biossíntese do ácido giberélico, hormônio responsável pela multiplicação e alongamento celulares. Assim, sua aplicação leva à redução do comprimento dos internódios dos ramos vegetativos e reprodutivos, do tamanho das folhas e, consequentemente, do aparato foliar. Ou seja, o uso de reguladores de crescimento possibilita o adensamento populacional com consequente aumento da produção de frutos por área.

O ajuste da altura e a melhor arquitetura das plantas, com índice de área

foliar adequado ao espaçamento entrelinhas adotado, proporcionam melhor aproveitamento da luz incidente e transmitida no dossel da cultura. Consequentemente, com benefícios potenciais para o aumento da retenção de frutos nas primeiras posições (principalmente entre o 5º e 10º ramo frutífero), incremento na precocidade de abertura das maçãs (3 a 12 dias) e melhoria na eficiência da colheita e na qualidade das fibras e sementes. Assim, a conformação estrutural do algodoeiro (piramidal) deve ser priorizada quando da adoção de estratégias de manejo (adubações nitrogenadas, espaçamento, densidade de plantas na linha etc.).

Cuidados devem ser tomados para evitar o “achatamento da cultura” (*figura 12*), que pode reduzir a penetração de luz e de defensivos, bem como aumentar significativamente a umidade relativa no dossel. Tal fato é comum quando as aplicações iniciais de regulador de crescimento não são bem equacionadas, seguidas de altas doses e/ou intervalos reduzidos com intuito de ajustar a altura final das plantas ao planejamento inicial. Vale ressaltar que a arquitetura equilibrada das plantas é mais importante que a altura final. Portanto, é preferível, em condições específicas, que as plantas atinjam a altura final um pouco mais elevada, porém estejam estruturalmente mais adequadas e eficientes quanto ao aproveitamento da energia disponível (Chiavegato et al., 2012).

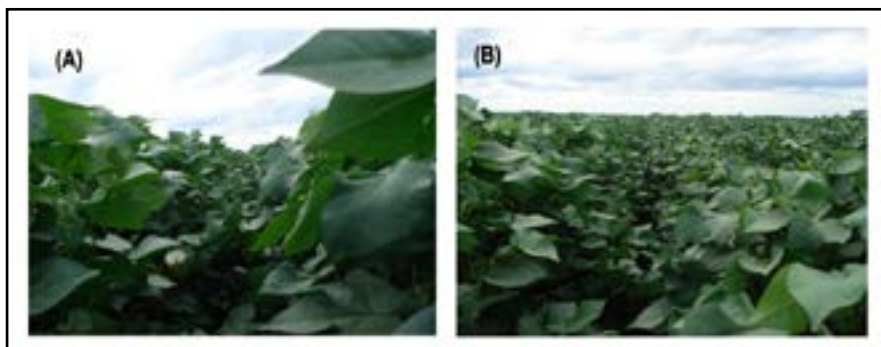


Figura 12. (A) Plantas com estrutura piramidal, favorecendo a penetração de luz no dossel, e (B) plantas “achatadas” pelo uso inadequado de regulador de crescimento, favorecendo o autossombreamento e alta umidade no dossel. (E. J. Chiavegato)

Considerando que os reguladores de crescimento auxiliam no controle da proporção entre crescimento vegetativo e reprodutivo, e que esse crescimento muda constantemente durante o ciclo do algodoeiro, a tomada de decisão quanto a épocas e doses a serem aplicadas requer monitoramento frequente e intensivo do crescimento das plantas durante todo o ciclo da cultura. Portanto, as equipes de campo são imprescindíveis, pois suprem as informações necessárias para a tomada de decisão.

6. Direção das linhas de plantio

Muito se comenta sobre a importância da direção das linhas de plantio quanto ao melhor aproveitamento da radiação solar. De uma forma geral, linhas de plantio na direção norte-sul propiciam melhor padrão de interceptação da luz e maiores produções que linhas de plantio na direção leste-oeste (Loomis & Williams, 1969; Baker & Meyer, 1966). Entretanto, em algumas situações, a direção de plantio pode não ser a mais favorável para a produção da cultura, em função do excesso localizado de exposição solar (Batistela Sobrinho et al., 1984), ou por não favorecer a circulação de ar no dossel, condição esta importante nas lavouras de algodão, podendo conseqüentemente aumentar o apodrecimento de maçãs no baixeiro por reidratação, bem como aumentar a incidência de doenças foliares e das maçãs.

Referências bibliográficas

BAKER, D. N.; MEYER, R. E. Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. **Crop Science**, v.6, p.15-19, 1966.

BATISTELLA SOBRINHO, I.; MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R. Influência da face de exposição e sentido das ruas na produção do café conilon nas condições de Mato Grosso - Alta Floresta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 11., Londrina, 1984. **Anais**. Rio de Janeiro: IBC, GERCA, 1984. p. 316-317.

BELTRÃO, N. E. de M.; AZEVEDO, D. M. P. de. Defasagem entre as produtividades real e potencial do algodoeiro herbáceo: limitações morfológicas, fisiológicas e ambientais. Campina Grande-PB: EMBRAPA - CNPA. 1993. 108 P. (EMBRAPA - CNPA. Documentos, 39).

CHIAVEGATO, E. J.; SILVA, A. V.; GOTTARDO, L. C. B. Densidade e arranjo de plantas em sistema adensado. In: **O sistema de cultivo do algodoeiro adensado em Mato Grosso**. Defanti Editora, Cuiabá-MT. 2010. pp. 121-133.

CHIAVEGATO, E. J.; MELO, F. L. A.; CARVALHO, H. da R. Uso de regulador de crescimento. In: **Manual de boas práticas de manejo do algodoeiro em Mato Grosso**. IMAmt - Instituto Mato-grossense do Algodão. Cuiabá-MT, Sfra 2012/13. 2012. 5: 162-166.

CONSTABLE, G. C.; OOSTERHUIS, D. M. Temporal dynamics of cotton leaves and canopies. pp. 72-79. In: STEWART, J. M., OOSTERHUIS, D. M., HEITHOLT, J. and MAUNEY, J. R. (eds.). **Physiology of Cotton**. Springer. ISBN, 2010. 978-90-481-3419-5.

COTHREN, J. T. 1994. Use of growth regulators in cotton production. In: CONSTABLE, G. A. and FORRESTER, N. W. (eds.). **Challenging the future**. CSIRO, Austrália. 1994. pp. 6-24.

HAKE, K.; BURCH, T.; HARVEY, L.; KERBY, T.; SUPAK, J. Plant population. **The Cotton Physiology Today**, v.2, n. 4, Fev. 1991a.

HAKE, K.; BARKER, G.; KRIEG, D.; MAUNEY, J. Cotton's microclimate. **The Cotton Physiology Today**, v.2, n. 5, Mar/Abr. 1991b.

HEARN, A. B. The principles of cotton water relations and their application in management. In: CONSTABLE, G. A. and FORRESTER, N. W. (eds.). **Proc. World Cotton Research Conference** (1st:1994 Brisbane, Queensland). CSIRO, Melbourne, Austrália. 1995. pp. 66-90.

KAWAKAMI, E. IX Congresso Brasileiro de Algodão, 2013, Brasília, DF. Sala Especializada 13 - Novas cultivares para o Brasil - TMG. Apresentação oral.

LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A. Productivity and the morphology of crop stands: pattern with leaves. In: EASTIN, J. D. (ed.) **Physiological aspects of crop yield**. Madison: American Society of Agronomy, 1969. p.27-47.

LÖVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KUELEN, H. **Principles of production of ecology**. Wageningen: Agricultural University of Wageningen. 1995. 121p.

MITCHELL, R. L. **Crop growth and culture**. Ames: Iowa State University Press, 1979. 349p.

MONTEIRO, J. E. B. A.; CHIAVEGATO, E. J.; SENTELHAS, P. C.; CIA, E.; PIZZINATO, M. A. Microclima e favorecimento de doenças em algodoeiro adensado. IV Congresso Brasileiro de Algodão, 2003, Goiânia-GO. Anais.

NASYROV, Y. S. Genetic control of photosynthesis and improving of crop productivity. **Annual Review of Plant Physiology**, v.29, p.215-237, 1978.

NETO, M. S. A. et al. Zoneamento agroecológico e definição de época de semeadura do algodoeiro no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo fundo, v. 9, n. 3, p. 422-428, 2001.

PEREIRA, A. R. Competição intraespecífica entre plantas cultivadas. **O Agromônico**, v.41, p. 5-11, 1989.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba, 2007. 192 p.

RIGHI, N. R.; FERRAZ, C. A. M.; CORRÊA, D. M. Cultura. In: In: NEVES, O. S.

et al. **Cultura e adubação do algodoeiro**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1965. p. 256-317.

SAEKI, T. Light relations in plant communities. In: L.T. Evans (ed.). **Environmental Control of Plant Growth**. Academic Press, New York and London. 1963. pp. 79-94.

SILVA, A. V.; MONTEIRO, J. E. B. A.; CHIAVEGATO, E. J.; BERNARDES, M. S. Transmissão e absorção de radiação solar no dossel do algodoeiro em três espaçamentos entrelinhas.. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2005, Campinas, SP. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 2005.

SILVERTOOTH, J. C.; EDMISTEN, K. L.; MCCARTY, W. H. Production practices. Cap. 3.2, 1999. pp. 451-488. In: SMITH, W. and COTHREN, J. S (eds.). **Cotton: Origin, History, Technology and Production**. John Wiley and Sons, Inc.

THOMPSON, W. R. Cotton production for high yields and quality. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. (eds.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1999. Cap. 2, pp. 9-14.

WELLS, R.; MEREDITH, W. R. Jr. Comparative growth of obsolete and modern cotton cultivars. I. Vegetative dry matter partitioning. **Crop Sci.** 24:858-862. 1984a.

WELLS, R.; MEREDITH, W. R. Jr. Comparative growth of obsolete and modern cotton cultivars. II. Reproductive dry matter partitioning. **Crop Sci.** 1984a. 24:863-868. 1984b

WELLS, R.; MEREDITH, W. R. Jr. Comparative growth of obsolete and modern cotton cultivars. III. Relationship of yield to observed growth characteristics. **Crop Sci.** 24:868-872. 1984c

WELLS, R.; STEWART, A. M. Morphological alterations in response to management and environment. Cap. 3, pp. 24-32. In: STEWART, J.M., OOSTERHUIS, D. M., HEITHOLT, J. and MAUNEY, J. R. (eds.). **Physiology of Cotton**. Springer. ISBN 978-90-481-34194-5. 2010.

WELLS, R. Light and the cotton plant. In: OOSTERHUIS, D. M. (ed.). **Stress physiology in cotton**. Tennessee: The Cotton Foundation, 2011. Cap. 4, pp. 73-83.

CAPÍTULO 3 ESTRESSE HÍDRICO

Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro

Stephen Yeates
CSIRO

A definição de estresse hídrico no algodoeiro tem sido controversa há algum tempo. Estresse hídrico, no contexto agrônômico, é a quantidade de água disponível para a planta que leva a uma redução no retorno econômico da cultura. Isso é diferente do estresse no contexto fisiológico, em que o problema pode ser se um processo específico é afetado ou não (Hearn, 1995). Os estresses agrônômico e fisiológico podem ser induzidos por déficit ou excesso de água.

1. Como o algodoeiro se desenvolve

O algodoeiro é uma planta perene, cultivada como cultura anual. Há um desenvolvimento simultâneo de estruturas vegetativas e reprodutivas sem inflorescência terminal. Consequentemente, o cultivo pode continuar indefinidamente enquanto as condições permanecerem favoráveis (fornecimento de água, nutrientes e temperatura). É crucial entender como a disponibilidade de água afeta a produtividade do algodoeiro, para integrar crescimento e desenvolvimento. O período até o primeiro botão floral, a primeira flor, o desenvolvimento de maçãs individuais e a taxa de produção de nós até o florescimento são determinados pela temperatura. Enquanto a duração do período do florescimento e o tempo de maturação são determinados pelo índice de fixação dos frutos, que é influenciado pelo equilíbrio entre fornecimento de assimilados da fotossíntese, pela demanda das maçãs em desenvolvimento e pelo abortamento de estruturas frutíferas devido a pragas ou outros estresses, geralmente a produtividade final está correlacionada ao número de capulhos produzidos, que é proporcional à duração da fase

de florescimento ou ao tempo de maturação. Por essa razão, a disponibilidade de água, nutrientes e a população de plantas têm papéis importantes no desenvolvimento da produtividade.

2. O efeito da água no crescimento do algodoeiro

2.1. Manutenção da temperatura do dossel (resfriar a planta)

Pelo menos 95% da água absorvida pela planta de algodão é usada para resfriar a planta, para que a temperatura da folha possa ser mantida no limite ideal e favorável para a atividade enzimática. A fotossíntese é reduzida quando a transpiração de água pelo dossel (principalmente as folhas) não consegue manter a temperatura no limite ideal ($23,5^{\circ}\text{C}$ a 30°C). Isso porque, a energia que não é dissipada pela evaporação aquece o tecido da planta.

Muitos estudos mostram que o déficit hídrico está correlacionado com a temperatura da folha, que está correlacionada, por sua vez, à produtividade. Isso foi confirmado recentemente em lavouras de altas produtividades (3.500 kg ha^{-1}) na Austrália (Conaty et al., 2012). A temperatura do dossel foi controlada pela variação do fornecimento de irrigação. Tendo como base produtividade x temperatura média diurna do dossel, do pico do florescimento à maturação, a temperatura ideal do dossel para a cultivar foi de $29\pm 2^{\circ}\text{C}$ para a assimilação de carbono e $28\pm 2^{\circ}\text{C}$ para a produtividade, com produtividades diminuindo com temperaturas do dossel mais altas (figura 1). Houve uma temperatura máxima da folha similar para a condutância estomática, com o vapor de água a $29,4^{\circ}\text{C}$.

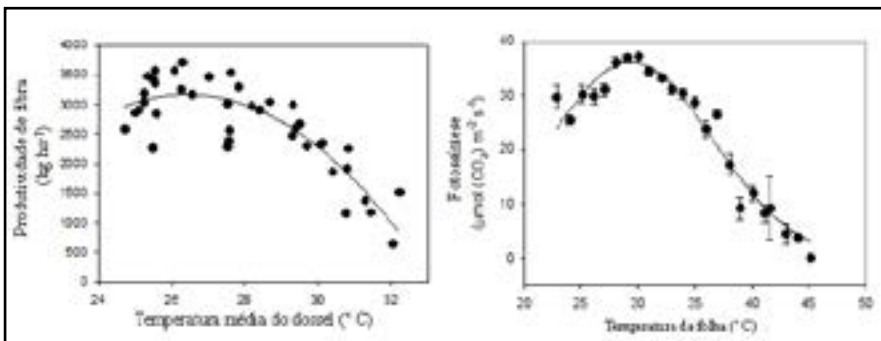


Figura 1. A relação de assimilação de CO_2 e produtividade, com a temperatura média diurna da folha ou dossel, do pico do florescimento à maturação (80 a 160 dias após a semeadura), quando a radiação solar $> 300\text{ J/m}^2/\text{s}$ (Fonte: Conaty et al. 2012).

2.2 Para criar pressão de turgescência

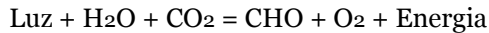
A água fornece a força para expandir as células e rigidez para as estruturas da planta.

2.3 Solvente

Os nutrientes do solo e metabólitos dentro da planta são dissolvidos na água e translocados pela planta no xilema e floema.

2.4. Um componente de processos bioquímicos

Os processos essenciais precisam de água como substrato (ex. síntese de açúcares pela fotossíntese)



3. A exigência de água e a eficiência do uso da água (EUA) no algodoeiro

A necessidade de água do algodoeiro durante seu ciclo tem sido derivada, na maior parte das vezes, em climas temperados, principalmente a partir de relações entre produtividade de fibra e a água usada através da evapotranspiração da cultura (ETc). A relação entre ΣETc (somatória de ETc) e produtividade de fibra foi linear até cerca de 700 mm de evapotranspiração e desviou dessa relação com valores mais altos de ΣETc (Orgaz et al., 1992; Tenakoon e Milroy, 2003). A eficiência do uso de água (EUA) nessa situação é calculada conforme a produtividade, dividida pela ΣETc e foi de 2,7 kg fibra/ha/mm de ETc até 700 mm de ETc no estudo de Orgaz et al. (1992), sugerindo uma partição constante de biomassa para a produtividade.

Hearn (1995) relatou a variação da EUA da cultura de 1,25 kg a 3,02 kg de fibra/ha/mm, embora um pouco dessa variação seja em razão de outros fatores (ex. nutriente, pragas). Experimentos recentes (Yeates et al., 2010a) usando cultivares Bt de alta produtividade (Bollgard II) e irrigação de sulco mediram a EUA como 3,81 kg de fibra/ha/mm para o déficit de irrigação mais eficiente e mais produtivo (tabela 1). A produção e a EUA foram aumentadas por meio de irrigação com menores volumes de água e com mais frequência que os usados anteriormente com cultivares não Bt, ou seja, 37% de PAW/ADP (água disponível para a planta) extraída com ΣETc similar. A resposta à irrigação mais frequente foi devida à maior proteção contra insetos da cultivar Bt, aumentando a retenção de frutos; conseqüentemente, a demanda diária por assimilados durante o florescimento e o enchimento das maçãs tornou a cultura mais sensível a pequenos aumentos na temperatura da folha, que reduziram a fotossíntese.

Tabela 1. O efeito do déficit de água do solo na produtividade, EUA (uso eficiente da água) da cultura e evapotranspiração (média de três anos/safras) (Adaptado de Yeates et al., 2010a). A ADP foi calculada como a diferença entre o limite superior drenado e o limite inferior da cultura de água do solo.

Déficit de Água do Solo (% de ADP* extraída)	Produtividade fibra (kg/ha)	EUA da Cultura (kg de fibra/ha/mm)	ΣE_t (mm)
18	2.830	3,67	772
28	2.894	3,81	759
37	2.573	3,58	717
55	2.034	3,06	656

*ADP: água disponível às plantas

4. Respostas da planta ao déficit hídrico

Avaliações do status de água na planta (ex. potencial de água da folha, temperatura do dossel), combinada com a água disponível às plantas no solo e o estágio de crescimento da cultura, fornecem, normalmente, a melhor indicação de estresse hídrico. Valores críticos para a depleção de água da planta e da água do solo são determinados em muitas regiões, por exemplo, até recentemente, depleção de >40% de ADP foi usada para o algodão irrigado na Austrália (*tabela 1*). Entretanto, os valores críticos variarão com a demanda evaporativa (temperatura do dossel) e as restrições físicas para absorção de água (sistema radicular danificado, salinidade).

A planta de algodão minimiza o estresse hídrico por:

4.1. Regulação osmótica para manter a turgescência (raízes, folhas)

A turgescência é mantida pelo acúmulo de componentes altamente solúveis de baixo peso molecular, que mantêm os gradientes de potenciais hídricos e previnem a perda de água. O algodoeiro tem maior habilidade para regulação osmótica que outras culturas superiores e adapta-se a ciclos prévios de estresse por meio do aumento da osmorregulação.

4.2. Redução da expansão celular

A expansão das células exige água e é reduzida em resposta ao déficit de água antes da divisão celular, da diferenciação celular ou fechamento do estômato. Por isso, a fotossíntese e a respiração continuarão após a expansão celular ter cessado. O crescimento expansivo de folhas jovens e entrenós é muito sensível ao potencial de água (Ψ). As maçãs são menos afetadas pelo déficit hídrico e manterão o crescimento após as folhas e entrenós terem parado de crescer. Isso ocorre porque a água é fornecida às maçãs pelo floema e não pelo xilema; logo, não é dependente do gradiente de potencial hídrico entre a planta e o solo ou atmosfera. As maçãs também exigem um maior Ψ para cessar o crescimento e podem manter o Ψ entre 0,3 e 0,5 MPa mais alto que as folhas.

4.3. Aumento do crescimento da raiz

O algodoeiro aumenta a partição de carboidratos para as raízes e isso é normalmente à custa do crescimento vegetativo ou dos frutos jovens. Além disso, as raízes têm maior porcentagem de regulação osmótica que as folhas.

4.4. Aumento da densidade específica da folha e produção de cera cuticular

Para proteger as folhas da perda de água e altas temperaturas.

4.5. Produção de proteínas de estresse

As proteínas de choque de calor e as de embriogênese tardia de vários tipos são produzidas, embora o mecanismo pelo qual elas contribuam para a tolerância à seca seja incerto.

4.6. Abortamento de frutos

O fruto mais jovem será abortado para manter o fornecimento de carboidrato para maçãs mais velhas.

5. A integração de nível de estresse hídrico da planta e o fornecimento de carboidratos

A morfologia complexa do algodoeiro, combinada com diferentes sensibilidades ao déficit de água nos níveis bioquímicos, celulares e dos órgãos, mostra que a produtividade pode ser reduzida pelo déficit hídrico de diferentes maneiras. Dentro da planta, a sensibilidade ao déficit hídrico é classificada conforme a seguir, na *figura 2*.



Figura 2.
A reação do algodoeiro à disponibilidade de água

Quando a disponibilidade de água é ideal, o crescimento do algodoeiro fica equilibrado entre crescimento vegetativo e reprodutivo (*figura 2*). A alta disponibilidade de água sem encharcamento estimula o crescimento expansivo de folhas e caules, que podem produzir crescimento vegetativo excessivo. Conforme o estresse hídrico aumenta, a planta prioriza o crescimento das maçãs e capulhos mais velhos ou raízes, em relação ao novo crescimento vegetativo ou à produção de novas posições frutíferas. O déficit hídrico tem o maior efeito sobre o crescimento expansivo da fibra (comprimento).

5.1. Fotossíntese

Como em muitas culturas, após o início do déficit hídrico, a fotossíntese continua além do crescimento expansivo (*figura 3*). A principal razão para isso é que o estômato é menos sensível ao estresse que a expansão da folha ou células do caule pelo turgor. A expansão da folha terá somente um impacto significativo na fotossíntese da cultura até o fechamento do dossel (IAF=3). Antes do fechamento do dossel, a suficiência do estresse hídrico para capacidade fotossintética atual é mantida, enquanto a expansão da folha e o desenvolvimento são reduzidos e possibilitam a continuação do crescimento do fruto e da raiz por mais tempo durante períodos de estresse hídrico. Porém, a capacidade para crescimento futuro é reduzida.

O déficit hídrico é relatado para reduzir a taxa fotossintética, por meio de uma combinação de limitações estomáticas e não estomáticas (Loka et al., 2011). O estômato começa a fechar como reação ao declínio do potencial de água da folha, que diminui o índice de perda de água, mas diminui também a entrada de CO₂ na planta, e a fotossíntese diminui. As plantas de algodão adaptam-se à exposição anteriormente ao déficit hídrico e têm condutância estomática mais elevada sob potenciais hídricos foliares muito baixos do que as plantas não adaptadas (Ackerson, 1981; Ackerson e Herbert, 1981). As limitações não estomáticas são devido à diminuição metabólica e são consideradas por ocorrerem sob condições de estresse severo de seca. A alta temperatura da folha produz inibição térmica da RuBisCO e outras enzimas, o que é mais provável de acontecer em climas quentes e secos (Carmo-Silva et al., 2012).

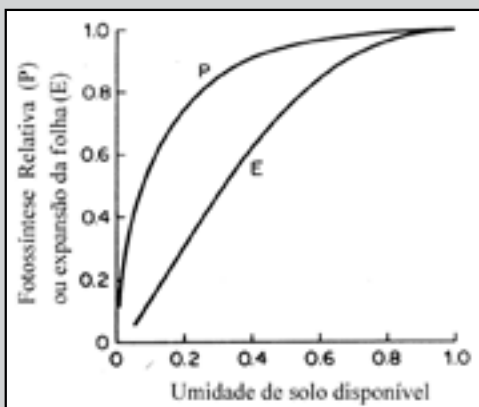


Figura 3.

A expansão da folha é mais sensível à água disponível do solo que a fotossíntese (adaptado de Constable e Rawson, 1982).

5.2. Outros processos bioquímicos

Os dados sobre o impacto do déficit hídrico na respiração são limitados e inconsistentes para o algodoeiro. A respiração em maçãs aumenta quando o estresse se torna severo. A translocação de carboidratos é menos sensível ao baixo Ψ que a fotossíntese; a principal consequência do estresse hídrico na translocação está na disponibilidade de fotoassimilados.

O déficit hídrico induz ao estresse oxidativo, devido à inibição da fotossíntese, resultante da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). O declínio na fixação de CO_2 provoca o escoamento de elétrons para o O_2 , a beta-oxidação de ácidos graxos e fotorrespiração. Os compostos de O_2 reativos produzidos durante o estresse hídrico podem prejudicar lipídeos, proteínas, carboidratos e ácidos nucleicos. Os sistemas antioxidantes na planta podem protegê-la, mas a atividade varia significativamente (genótipo e espécie). A informação específica para o algodoeiro ainda é limitada.

5.3. Diferenças de genótipo

Há muita variabilidade genética em atributos associados à eficiência do uso de água e à tolerância ao estresse hídrico (seca ou encharcamento). Muitos genes estão envolvidos com a herança complexa, então é pouco provável que um único caráter concederá resistência (Hearn, 1995; Loka et al., 2011; Christianson et al., 2010). Pesquisas passadas avaliaram a diversidade genética em muitas características conhecidas por serem associadas à eficiência do uso de água e tolerância à seca. Por exemplo, a fotossíntese, a condutância estomática, taxa de transpiração, peso específico da folha, temperatura do dossel, fluorescência da folha, discriminação isotópica de carbono da folha, regulação osmótica da raiz e folha. O encharcamento tem sido conhecido por alterar a expressão de 1012 e 1305 genes nos tecidos da raiz e da folha, respectivamente. O etileno é o principal hormônio envolvido na reação ao encharcamento; um maior entendimento da relação entre taxa fotossintética, produção de carboidratos, fermentação e pós-recuperação ajudaria na identificação de estratégias para planejar a tolerância ao encharcamento (Christianson et al., 2010).

O sucesso na seleção de genótipos tolerantes à seca tem sido limitado. Isso acontece, em parte, devido ao número de respostas contraditórias relatadas. Por exemplo, a seleção para o rápido crescimento da raiz antes do florescimento aumentou a força de dreno da raiz, causando o abortamento do fruto sob estresse, consequentemente, a produtividade foi menor (Cook e El Zik, 1992). Há também necessidade de cuidado na seleção para o uso biológico eficiente da água (EUA). Por exemplo, o aumento da condutância de água em folhas aumentou as produtividades e a EUA agrônômica, devido à temperatura reduzida da folha, mas a EUA biológica foi reduzida (Radin et al., 1994).

Por haver muitos modos do algodoeiro adaptar-se ao déficit hídrico, a seleção de genótipos com características adequadas exige uma boa compreensão da variação climática e do padrão sazonal de disponibilidade de água na região de cultivo. Por exemplo, na Austrália, o algodão não irrigado é cultivado em solos argilosos usando a reserva de água do solo e a chuva

que ocorre na própria safra, que é variável, ocorrendo a qualquer momento durante a estação de cultivo. Stiller et al. (2004, 2005) descobriram que cultivares de folha okra (quiabo) com maturação tardia originavam produtividades e EUA maiores. Isso porque essas cultivares puderam responder ao fornecimento variável de água formando o fruto quando a água estava disponível e, devido a sua maturidade tardia, tiveram maiores possibilidades de compensação quando a chuva ocorria.

6. A sensibilidade do estágio de crescimento ao déficit hídrico

Os relatos são contraditórios para o estágio de crescimento mais sensível a maiores déficits de água. O estresse durante o florescimento e no enchimento das maçãs tem provocado, mais comumente, as maiores reduções de produtividade. É difícil comparar experimentos, devido às inconsistências na definição de estágios de crescimento (ex. desenvolvimento da maçã, florescimento pleno, início do florescimento). Fica claro que o impacto do déficit hídrico após a primeira flor dependerá da demanda do fruto por carboidratos e nutrientes, da água disponível e da profundidade da raiz, da radiação solar e da demanda evaporativa. O estresse pré-florescimento no tamanho do dossel, na produção das posições frutíferas e no desenvolvimento da raiz também afetará o crescimento após o florescimento.

A produção de matéria seca da planta ocorre pela transformação de energia luminosa em energia química (carboidratos) via fotossíntese, e a produtividade é maximizada ao alcançar-se o equilíbrio entre o acúmulo de matéria seca reprodutiva e vegetativa. O crescimento pode ser simplificado em três fases, tendo como base onde e quando a matéria seca é dividida dentro da planta (*figura 4*). Da semente à primeira flor, a matéria seca é, primeiramente, vegetativa, com o equilíbrio entre raiz e crescimento acima do solo sendo importante. Após a última flor efetiva aparecer (“cut-out”, o encerramento do crescimento), o número de frutos é determinado e eles ganham peso. Mais da metade do peso final do capulho é produzido durante essa fase. Entre a primeira flor e o “cut-out”, o crescimento de raiz é menos importante e há crescimento reprodutivo e vegetativo simultâneo. Deve haver fotossíntese suficiente para atender a demanda de frutos jovens e continuar o crescimento vegetativo e a produção das posições frutíferas, para que o número potencial de frutos possa ser maximizado. A disponibilidade de água é crítica nessa fase, porque muda o equilíbrio entre crescimento expansivo e a divisão de carboidratos para frutos mais velhos.

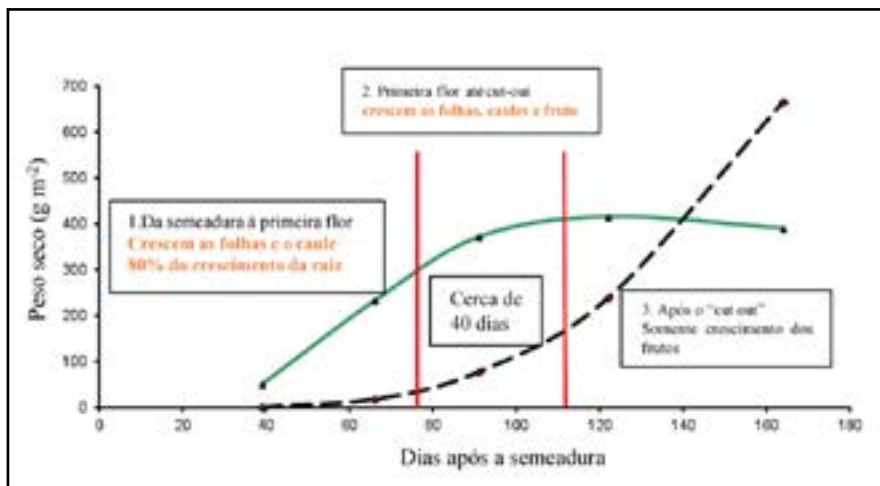


Figura 4. As fases de crescimento do algodão que mostram maior competição entre o crescimento vegetativo (▲) e reprodutivo (◊) por assimilados ocorrem durante o florescimento (Adaptado de Yeates et al., 2010b). A cultura de algodão mostrada foi totalmente irrigada, teve alta retenção de frutos e produziu 2.300 kg fibra/ha.

Pesquisas recentes na Austrália (região temperada 30°S) mostram uma maior sensibilidade ao déficit hídrico no final do florescimento com a utilização de novas variedades Bollgard II de produtividade muito alta (tabela 2). O acúmulo mais rápido de matéria seca do fruto, devido à maior retenção de frutos e à morfologia alterada (plantas menores sem a ponta do caule principal devido aos insetos-praga), tem aumentado a sensibilidade às reduções de curto prazo na fotossíntese. O florescimento tardio também coincidiu com o período de demanda evaporativa máxima nesses experimentos.

Tabela 2. Perda de produção (%) por dia de estresse hídrico (extração de >60% da água disponível da planta) (Fonte Yeates et al., 2010a#; Hearn e Constable 1984*), [^]14 dias > "cut-out".

Estágio de Crescimento	Passado Convencional*	BolgardII# Moderno
Botão floral	0,8	1,1
1ª Flor + 10 dias	1,6	1,7
Final do florescimento (Nós acima da Flor Branca - de 4 a 5)	1,4	2,7
Maturação do fruto	0,3	0,7 [^]

Estágios específicos de crescimento:

6.1. Da semente à emergência

A água do solo no momento da sementeira deve ser suficiente para que a semente seja embebida, mas não excessiva, o que limita o oxigênio. Leva aproximadamente 48 horas para a radícula ser emitida, e é essencial que haja água disponível no solo nesse momento. Após a emergência dos cotilédones, a transpiração começa. Contudo que haja água disponível no solo, doenças radiculares são o maior risco para morte de plântulas devido à falta de umidade. Uma superfície de solo que pode formar uma crosta após a secagem rápida é uma consequência indireta do déficit de água. O sistema de plantio direto, que inclui cobertura do solo, normalmente evitará a formação de crosta.

6.2. Estágio vegetativo (da emergência à primeira flor)

O crescimento da raiz é importante durante esta fase do crescimento (*figura 4*). Na maioria das culturas, o desenvolvimento da raiz é 80% completado até o florescimento, desse modo, a demanda da raiz por carboidratos é alta no início do desenvolvimento. Desde a emergência, a expansão da raiz é mais rápida que a expansão da área foliar, então a combinação de aumento de fornecimento de água do solo relativo à demanda significa que o déficit de água severo é menos provável nesse estágio. Após a emergência, o crescimento da raiz principal é de até 2,5 cm/dia por várias semanas. A extensão da raiz é inibida pelo encharcamento, compactação e temperatura do solo. Um problema maior nos trópicos é que a água excessiva no início do desenvolvimento inibirá o crescimento da raiz, o que pode ter impactos se ocorrer estresse hídrico ao final do ciclo, quando a área foliar é maior, porque a água disponível no solo para a planta será reduzida.

Os botões florais, o número de carpelos, anteras e óvulos por fruto são determinados antes da antese. O déficit hídrico pode reduzir o tamanho dos botões devido à menor fotossíntese, mas o efeito sobre o número de carpelos, antera e óvulos ainda não está claro. O dano ao tamanho futuro do capulho é minimizado nesse estágio porque a planta primeiramente reduzirá o crescimento vegetativo e a produção de posições frutíferas e abortará botões pós-florescimento para preservar os assimilados para os frutos remanescentes.

O estresse por déficit hídrico no pré-florescimento pode reduzir a produtividade pela menor área foliar (interceptação da radiação), e o déficit hídrico severo limitará a produção das posições frutíferas. O estresse por falta de água será mais importante durante a produção de botões florais antes do florescimento, já que a planta precisa estabelecer um dossel e um número de botões suficiente para ter um potencial produtivo alto.

Em culturas em que a água não é limitada, o aumento do crescimento vegetativo no início do ciclo causa sombreamento do baixeiro da planta, reduzindo a fotossíntese dessas folhas e suas posições frutíferas, diminuindo a retenção e o tamanho do fruto. A distribuição de capulhos no dossel da planta, comumente observada em forma piramidal, é o resultado do som-

breamento da folha e da competição dos frutos por carboidratos. O efeito do sombreamento na retenção de frutos na parte inferior do dossel será maior para o algodoeiro cultivado na safra úmida tropical, devido aos efeitos combinados do excesso de água no solo, produzindo expansão rápida de folha e a baixa radiação (*figura 5*).



Figura 5. O efeito da disponibilidade de água antes do florescimento no desenvolvimento do dossel e na retenção de capulhos no baixeiro. Esquerda: Algodão em Narrabi, Austrália (30°S) no início do florescimento, houve pouca chuva durante o ciclo, então, a irrigação pôde ser controlada para aumentar o crescimento da raiz e somente uma irrigação durante o cultivo foi realizada antes do florescimento. Direita: Algodão em Ayr, na Austrália tropical (19°S) no início do florescimento, a chuva durante o ciclo foi alta, o que favoreceu o crescimento vegetativo. As produtividades em ambos os locais foram superiores a 2.200 kg ha⁻¹ de fibra; em Narrabi, 57% da produção foi nos primeiros oito ramos frutíferos, em Ayr, devido ao sombreamento inicial, somente 36% da produção foi nos oito primeiros ramos frutíferos.

6.3. Da primeira flor até a última flor efetiva (“cut-out” - encerramento do crescimento)

A demanda dos frutos por carboidrato pode aumentar rapidamente após o florescimento (*figura 4*), conseqüentemente, a competição por carboidratos com o crescimento vegetativo também aumenta. A taxa na qual a demanda do fruto por carboidrato aumenta é proporcional à porcentagem de frutos fixados pela planta. O efeito da disponibilidade de água sobre o desenvolvimento e fixação do fruto é complexo, devido ao desenvolvimento simultâneo de folhas, caules, botões, flores e maçãs (*figura 4*). Cada órgão tem diferente sensibilidade à disponibilidade de água, combinado com o *feedback* ao suprimento de assimilados. Os botões diminuem a sensibilidade de abortamento por volta de 21 dias após o primeiro botão floral visível. O abortamento de estruturas frutíferas pode ocorrer até 14 dias após a antese (< 2 cm de diâmetro), quando o espessamento da parede da célula, entre o fruto e o caule, evita que uma camada de abscisão seja formada. Então, quando a demanda do fruto excede o fornecimento de carboidratos, o crescimento vegetativo é encerrado e maçãs jovens, flores e botões mais jovens

são abortados. Isso ocorre no algodoeiro sem estresse hídrico e chama-se “cut-out”. O estresse hídrico reduz o fornecimento de carboidrato devido à menor taxa fotossintética, causando, deste modo, o abortamento, por conta de a necessidade de acúmulo de carboidratos ser atingida mais rapidamente do que em uma planta não estressada.

O estresse hídrico antes do “cut-out” reduz ou interrompe o crescimento expansivo de folhas e caules, então o dossel desenvolve-se menos. A interceptação de luz pelo baixeiro do dossel é maior, e a prioridade pelos assimilados é dada aos frutos do baixeiro, que serão fixados. A menor taxa fotossintética pode interromper o desenvolvimento dos frutos, atrasar o desenvolvimento das posições frutíferas, e uma planta estressada pode atingir o “cut-out” mais precocemente que uma planta sem estresse.

O estresse hídrico próximo ao “cut-out”, ou durante esse, coincide com o estágio em que a demanda dos frutos pelos carboidratos da fotossíntese excede a capacidade de fornecimento da planta. O abortamento de botões, flores e maçãs jovens será maior que numa planta sem estresse e por terminar o crescimento vegetativo; a compensação por meio das novas posições frutíferas, após o déficit de água ser eliminado, é impedida. Se o déficit de água continuar, o tamanho dos frutos retidos será reduzido.

O alongamento da fibra exige água e ocorre durante os primeiros 20 dias após a antese. O comprimento da fibra é afetado quando os déficits de água estão altos (figura 2) ou Ψ de -2,3 até -2,8 MPa, e é mais provável sua ocorrência quando o déficit de água ocorre perto do florescimento para a maioria dos frutos na planta.

6.4. Do “cut-out” à maturação (crescimento do fruto)

A planta responderá ao déficit hídrico durante esta fase, primeiramente abortando frutos pequenos. Como um mecanismo de sobrevivência, a planta completará o desenvolvimento da semente e fibra em frutos mais velhos. Se o estresse hídrico persistir ou ocorrer mais tarde nesta fase, quando não houver frutos pequenos a serem abortados, o tamanho do capulho sofrerá redução. O espessamento da fibra pode ser reduzido quando o fornecimento de carboidratos for insuficiente na fase final de desenvolvimento do fruto, produzindo fibra imatura. “Motes” (sementes não desenvolvidas) também podem ocorrer. Em situações em que o abortamento de frutos jovens ou a ausência de déficit hídrico fornecer carboidrato em excesso para os frutos mais velhos, o desenvolvimento da parede secundária (espessamento) aumentará o índice micronaire.

Devido a uma proporção significativa do peso do capulho ser produzida durante essa fase (figura 4), o déficit hídrico severo ou prolongado pode causar grandes reduções de produtividade. A água em excesso pode ser prejudicial entre o “cut-out” e a maturidade. O crescimento vegetativo pode ser reiniciado se o déficit hídrico for reduzido pela chuva. O apodrecimento dos capulhos é mais provável, e a maturidade pode ser atrasada.

7. Água em excesso

A água em excesso pode ser prejudicial ao crescimento do algodão de duas maneiras. Primeiramente, quando a atividade da raiz não é inibida por baixo oxigênio, a alta umidade do solo pode estimular a rápida expansão de folhas e de células do caule. O crescimento vegetativo excessivo é o resultado mais frequente (*figura 2*). O abortamento facultativo de botões florais e maçãs jovens pode ocorrer, por ser pequena a diferença na turgescência entre o fruto e os órgãos vegetativos; o fornecimento de assimilados para o fruto é reduzido em favor das estruturas vegetativas. O abortamento removerá um dreno de assimilados, o que pode aumentar ainda mais o crescimento vegetativo. O crescimento vegetativo em excesso é de provável ocorrência quando o algodão é cultivado em solos bem drenados, na estação úmida tropical. Em segundo lugar, devido aos efeitos do encharcamento, quando o excesso de água no solo reduz a porosidade preenchida por ar a <10%, o crescimento e a atividade da raiz são prejudicados pelas baixas concentrações de O₂. O encharcamento pode ocorrer mais provavelmente em solos muito argilosos pouco drenados. Reduções de produtividade de até 40% ou de 2,4% por dia de encharcamento têm sido relatadas (Hodgson e Chan, 1982). O encharcamento reduz o crescimento da raiz, a absorção de nutrientes, a área foliar, a condutância estomática, o potencial de água da folha e a fotossíntese. Por isso, a produção de algodão é mais sensível ao encharcamento que ocorre até a metade do período de florescimento (Bange et al., 2004).

8. Implicações para o cultivo do algodão durante a estação úmida tropical no Brasil

O padrão sazonal de disponibilidade de água para o cultivo do algodão no Brasil é amplamente similar aos trópicos de monção em outros países (ex. Índia ou Austrália). Há uma chuva de monção definida nos meses de verão e um inverno seco, com um período de transição no começo e ao final da estação úmida, quando a chuva aumenta ou diminui, após os meses secos ou úmidos, respectivamente. Os desafios para o cultivo do algodoeiro não irrigado são o excesso de água, a baixa radiação e alta umidade no início da estação de cultivo, que reduzirão o crescimento da raiz e favorecerão o crescimento vegetativo, particularmente de folhas, e causarão o abortamento do fruto. A semeadura antecipada também tornará as plantas mais suscetíveis à baixa radiação durante o crescimento do fruto.

As plantas não são aclimatadas para uma mudança rápida de uma condição úmida para seca no período de transição das estações e são muito suscetíveis ao déficit hídrico nessa fase. A extensão do período de florescimento, para compensar o abortamento de frutos ou estresse de umidade durante a transição das estações úmida e seca, é limitada pela diminuição da dis-

ponibilidade de água, pela redução do comprimento do dia e temperaturas mais baixas. A redução do espaçamento entrelinhas pode reduzir o período de florescimento, mas deverá também aumentar o uso de água no início do ciclo, devido à maior área foliar. A proporção na qual o uso de água no início do ciclo é uma restrição para a produção dependerá da disponibilidade de água no solo e em quantos dias o período de florescimento será reduzido. A previsão da produtividade associada com diferentes estratégias de manejo, usando modelos de crescimento do algodoeiro validados localmente e combinados com registros climáticos históricos, ajudará a identificar as estratégias mais confiáveis para minimizar os impactos do estresse hídrico.

Referências bibliográficas

ACKERSON, R. C. Osmoregulation in cotton in response to water stress. II. Leaf carbohydrate status in relation to osmotic adjustment. **Plant Physiol.** 67:489-493. 1981.

ACKERSON, R. C.; HERBERT, R. R. Osmoregulation in cotton in response to water stress. I. Alterations in photosynthesis, leaf conductance, translocation and ultrastructure. **Plant Physiol.** 67:484-488. 1981.

BANGE, M. P. MILROY, S. P. THONGBAI, P. Growth and yield of cotton in response to waterlogging. **Field Crops Research** 88:129-142. 2004.

CARMO-SILVA, A. E.; GORE, M. A.; ANDRADE-SHANCHEZ, P.; FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; SALVUCCI, M. E. Decreased CO₂ availability and inactivation of RuBisCO limit photosynthesis in cotton plants under heat and drought stress in the field. **Environmental and Experimental Botany** 83: 1– 11. 2012.

CHRISTIANSON, J. A.; LLEWELLYN, D. J.; DENNIS, E. S.; WILSON, I. W. Global Gene Expression Responses to Waterlogging in Roots and Leaves of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) **Plant Cell Physiol.** 51(1): 21–37. 2010.

CONATY, W.C., BURKE J. J., MAHAN JR., NEILSON, J. E., SUTTON B.G. (2012). Determining the optimum plant temperature of cotton physiology and yield to improve plant-based irrigation scheduling. **Crop Sci.** 52:1828-1836.

COOK, C. G.; EL-ZIK, K. M. Cotton seedling and first-bloom plant characteristics: relationships with drought-influenced boll abscission and lint yield. **Crop science**, v. 32, n. 6, p. 1464-1467, 1992.

CONSTABLE, G. A.; RAWSON, H. M. Distribution of a 14-C label from cotton leaves: consequences of changes water and nitrogen status. *Aust. J. Plant Physiol.* 9: 735-747. 1982.

HAKE, K. D.; GRIMES, D. W. Crop water management to optimise growth and

yield, Ch23 In: J.McD. Stewart et al. (eds.), **Physiology of Cotton**. 2010.

HEARN, A. B. The principals of cotton water relations and their application in management. In: CONSTABLE, G. A. and FORRESTER, N. W. (Eds.) Challenging the Future: **Proceedings of the World Cotton Research Conference - 1**. Brisbane, Austrália, February 14-17, 1994, CSIRO, Melbourne, p 66-92. 1995.

HEARN, A. B.; CONSTABLE, G. A. Cotton, Ch 14, In: GOLDSWORTHY, P. R., FISHER, N. M., (Eds). **The Physiology of tropical food crops**. John Wiley & Sons, Chichester, pp 495-527. 1984.

HODGSON, A. S.; CHAN, K. Y. The effects of short term waterlogging during furrow irrigation of cotton in a cracking clay. **Aust. J. Agric. Res.** 33:109-116. 1982.

LOKA, D. A.; OOSTERHUIS, D. M.; RITCHIE, G. L. Water-deficit stress in cotton. In: OOSTERHUIS, D. M. (ed). **Stress Physiology in Cotton**, Number 7, Cotton Foundation Reference Book Series. The Cotton Foundation, Codiva Tennessee, USA, p 37-72. 2011.

ORGAZ, G.; MATEOS, L.; FERERES, E. Season length and cultivar determine optimum evapotranspiration deficit in cotton. **Agron. J.** 84: 700-706. 1992.

RADIN, J. W., LU, Z., PERCY, R. G., ZEIGER, E. Genetic variability for stomatal conductance in Pima cotton and its relation to improvements of heat adaptation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 91(15), 7217-7221. 1994.

STILLER, W. N.; REID, P. E.; CONSTABLE, G. A. Maturity and leaf shape as traits influencing cotton cultivar adaption to dryland conditions. **Agron. J.** 96:656-664. 2004.

STILLER, W. N.; READ, J. J.; CONSTABLE, G. A.; REID, P. E. Selection for water use efficiency traits in a cotton breeding program: Cultivar differences. **Crop Sci.** 45:1107-1113. 2005.

TENNAKOON, S. B.; MILROY, S. P. Crop water use and water use efficiency on irrigated cotton farms in Australia. **Agric. Water Man.** 61:179-194. 2003.

YEATES, S. J.; ROBERTS, J. M.; RICHARDS, Q. D. High insect protection GM Bt cotton changes crop morphology and response to water compared to non Bt cotton. In: "Food Security from Sustainable Agriculture" Edited by H. Dove Proceedings of 15th Agronomy Conference 2010, 15-18 November 2010, Lincoln, New Zealand. <http://www.regional.org.au/au/asa/2010a>.

YEATES, S. J.; CONSTABLE, G. A.; MCCUMSTIE, T. Irrigated cotton in the tropical dry season. II. Biomass accumulation, partitioning and RUE. **Field Crops Res.** 116: 290-299. 2010b.

Parâmetros fisiológicos para seleção de cultivares tolerantes ao déficit hídrico

Giovani G. de Brito
Embrapa Clima Temperado

O algodão é a mais importante fonte de fibras naturais, e seu cultivo no Brasil é anterior à colonização europeia. Até o fim da década de 1980, o algodão foi cultivado em duas áreas principais, as regiões Nordeste e Centro-Sul do Brasil. Fatores socioeconômicos, ambientais e fitossanitários causaram o colapso da cotonicultura nas áreas tradicionalmente produtoras, e o algodoeiro praticamente desapareceu do país. Na Região Sul do Brasil, as áreas previamente ocupadas pela cultura do algodão foram utilizadas para espécies como cana-de-açúcar, soja e milho, o que não ocorreu na Região Nordeste, onde outras culturas, incluindo o algodoeiro herbáceo, não substituíram com sucesso a área anteriormente ocupada. Assim, aproximadamente 3 milhões de hectares cultivados com o algodoeiro do tipo Mocó (*Gossypium hirsutum* raça *marie galante*, L. Hutch) ficaram subutilizados, por conta, em parte, da ocorrência de clima quente e seco.

Em meados da década de 1990, essa cultura migrou para o bioma Cerrado brasileiro. Atualmente, somente o algodoeiro herbáceo é cultivado no Brasil, em uma área de aproximadamente 1 milhão de hectares, fazendo do país o quarto maior produtor mundial de algodão em pluma (Conab, 2013).

Nas regiões produtoras do Cerrado, responsável por cerca de 96% da área cultivada, o risco de ocorrência de veranicos é alto, e a produtividade de pluma poderá ser afetada, especialmente nos cultivos de segunda safra ou “safrinha”. Nesse cenário de cultivo, para grande parte das áreas produtoras do Cerrado, a janela de semeadura é relativamente curta; e mesmo para aqueles produtores que conseguirem semear até a primeira quinzena de janeiro, os riscos de ocorrência do déficit hídrico a partir da fase reprodutiva ainda persiste. Como exemplo, os veranicos ocorridos nos últimos

três anos nas áreas produtoras do Estado de Goiás (sudoeste do Estado) resultaram em redução de produtividade da ordem de aproximadamente 30%; sendo que a mesma tendência tem sido relatada por produtores de várias outras regiões de cultivo (comunicação pessoal). Para o Estado de Mato Grosso, maior produtor de algodão do país, a expansão do cultivo em “safriinha” predispõe ainda mais esta cultura aos riscos de ocorrência da deficiência hídrica, devido à redução das chuvas a partir do mês de março (INMET, 2013). Assim, a adoção de estratégias de mitigação dos riscos associados às perdas de produtividade em decorrência do déficit hídrico no algodoeiro permitirá maior estabilidade da produção para o Cerrado; contribuindo para a maior sustentabilidade da cultura sob uma perspectiva mais ampla, ou seja, em um contexto de sistema de produção, no qual a mesma está inserida.

Nesse cenário desafiador, abordagens que envolvam ajustes no manejo da cultura e no sistema de produção que integra impactarão positivamente, reduzindo os efeitos negativos de veranicos sobre a produtividade. Adicionalmente, novas estratégias e ferramentas disponíveis oferecem aos programas de melhoramento novas oportunidades para dissecação e manipulação das bases genéticas e funcionais envolvidas nos componentes de produção e estabilidade de rendimento sob condições de deficiência hídrica; já que as plataformas envolvendo as “ômicas” permitem-nos extensiva caracterização do transcriptoma, metaboloma e do proteoma em um tempo e custos cada vez menores. De outro modo, ao considerarmos a quantidade de dados produzidos a partir destas abordagens moleculares da última década, os resultados aplicáveis obtidos ainda são incipientes no sentido da obtenção de tecnologias visando mitigar os efeitos do déficit hídrico sobre as culturas agrícolas; o que, ao menos em parte, poderia ser explicado pelo atraso no desenvolvimento de plataformas com capacidade para efetuar fenotipagem em larga escala e com qualidade em termos de resolução temporal e espacial adequados, de modo a permitir maior robustez e integração da genotipagem com a fenotipagem.

Assim, considerando o histórico atual em termos da ocorrência cada vez mais frequentes de anomalias climáticas, somado aos cenários de incertezas divulgados periodicamente nos últimos anos, diversas instituições e grupos de pesquisa, direta ou indiretamente ligados ao tema em questão, dispõem esforços de modo a estabelecer, refinar e validar modelos climáticos, visando estimar com maior precisão os impactos dessas modificações nos elementos climatológicos sobre os agroecossistemas terrestres. Este será um dos nossos maiores desafios no futuro, ou seja, o de conciliar a demanda crescente por produção em um cenário de crescimento populacional e uso de produtos agrícolas para a produção de biocombustíveis sob a perspectiva de maior variabilidade climática em decorrência das mudanças globais (IPPC, 2007; Marin et al., 2013; Cuadra et al., 2012). Nesse contexto, a exemplo de outras culturas agrícolas, os programas de melhoramento genético do algodoeiro necessitarão direcionar esforços visando a definição de estratégias, de modo a vislumbrar a obtenção de cultivares cada vez mais estáveis frente aos eventos de anomalias climáticas, que incidirão mais frequentemente e com maior intensidade nas áreas produtoras de algodão no

país. Dessa maneira, coloca-se a seguinte questão: estamos nos preparando para lidar com quais eventos de anomalias climáticas? Com aqueles que conhecemos pelo seu histórico de ocorrência ou com aqueles para os quais não temos nenhuma experiência prévia em termos de frequência, intensidade e duração? Nesta linha de raciocínio, nossas ferramentas de manejo e as estratégias de melhoramento genético que visam mitigar tais efeitos estão abordando a questão sob qual perspectiva?

Com o intuito de familiarizar o leitor não diretamente ligado ao tema em discussão, inicialmente será interessante definirmos algumas nomenclaturas e mecanismos de adaptação à deficiência hídrica, antes de discorrermos sobre os fatores que afetam a qualidade dos dados mensurados sob condições de deficiência hídrica, o que conseqüentemente prejudica sua usabilidade junto aos programas de melhoramento ou sua integração com os dados resultantes das plataformas de genotipagem atualmente disponíveis. Embora nossa abordagem empregará como referência os estudos desenvolvidos a partir do algodoeiro, os conceitos apresentados poderão ser válidos para outras culturas.

1. Tolerância à deficiência hídrica: nomenclatura e mecanismos

Embora tenhamos para o termo “seca” diferentes origens e este esteja amplamente difundido, a expressão “deficiência hídrica” é a que melhor se ajusta ao objetivo em discussão, já que ele se refere a uma condição em que a quantidade de água disponível por meio das chuvas ou suplementada via irrigação não supre a demanda transpiratória da cultura. Acerca das várias definições propostas para o termo “tolerância à deficiência hídrica”, aquela proposta primeiramente por Levitt (1972) ainda mantém sua validade, permitindo-nos categorizar as estratégias que possibilitam às plantas mitigar os efeitos negativos da deficiência hídrica. Este autor também classificou os diferentes mecanismos ou estratégias de tolerância à deficiência hídrica em duas categorias: evitância e tolerância à desidratação. É importante salientar que todas essas estratégias empregadas pelas plantas para responder ao estresse não são mutuamente excludentes, de modo que podem combinar-se. Por exemplo, a “tolerância” poderá ocorrer se a planta for capaz de manter um balanço hídrico favorável por meio da expressão de caracteres morfofisiológicos, os quais reduzem a perda de água via transpiração por meio de mecanismos mais elaborados, que regulam a condutância estomática e/ou aumentam sua capacidade de absorção de água pelo crescimento de um sistema radicular mais robusto, permitindo-lhe explorar camadas mais profundas do perfil do solo; outros caracteres como precocidade, deposição de cera sobre a folha e ajuste osmótico que também habilitam a planta, ou parte dela, a manter-se hidratada estão inseridos na estratégia utilizada para evitar a desidratação (evitância à desidratação).

De outro modo, plantas que respondem pela remobilização de carboidratos solúveis de suas hastes e/ou investem na síntese e acúmulo de proteínas que atuam na proteção de estruturas celulares, muitas vezes pela expressão de genes (fatores transcricionais) envolvidos em vias dependentes ou não de ácido abscísico e de outros hormônios, utilizam tal estratégia para manter, ao menos parcialmente, suas estruturas funcionais sob condições de severa desidratação, de modo que se valem da estratégia de tolerância à desidratação ou tolerância à deficiência hídrica mais adequada ao tópico em discussão. Concernente aos demais aspectos a serem aqui tratados, é importante ressaltar que a condução de experimentos cuidadosamente planejados e conduzidos sob condições controladas permitir-nos-á isolar a ação de locos envolvidos na evitância daqueles responsáveis pela tolerância à deficiência hídrica. Neste sentido, existe vasta bibliografia dedicada a tratar dos mecanismos com os quais as plantas respondem à deficiência hídrica e as estratégias que podem melhorar o rendimento sob tais condições (Boyer, 1995; Blum, 1988, 1996, 2009; Brito et al., 2011, 2011b, 2014; Centritto et al., 2009; Kloth & Turley, 2010; Leidi et al., 1999; Passioura, 1996, 2007, 2010; Radin et al., 1994; Richards, 1996; Lu et al., 1996; Sinclair et al., 2004; Sinclair, 2011; Zhu et al., 2010, Reynolds & Tuberosa, 2008).

Para estudos conduzidos a campo, o primeiro passo a ser considerado é a definição dos ambientes-alvo do estudo, ou seja, para quais ambientes se destinarão os esforços visando avaliar e selecionar genótipos para o melhor desempenho e/ou estabilidade de rendimento frente ao estresse em questão. Diferenças nos ambientes-alvo do estudo são geralmente determinadas pelo padrão de interação genótipo-ambiente em longo prazo. Isto explica, em parte, os motivos que levam os programas de melhoramento do algodoeiro no Brasil a concentrarem seus esforços nas áreas produtoras do bioma Cerrado, considerando serem estas responsáveis pela maioria da área cultivada com algodão e pela produção de pluma no país. Assim, a identificação e a caracterização dos ambientes-alvo têm sido auxiliadas pelo emprego de modelos de simulação com base em históricos de dados edafoclimatológicos. Estas ferramentas permitem a caracterização do ambiente-alvo pela determinação da frequência de ocorrência de estresses abióticos específicos a partir da série histórica de dados ao longo do ciclo da cultura (Chapman et al., 2003).

Tomando-se por base o gradativo aumento de importância do cultivo de algodão no Cerrado em segunda safra, decorrente do incremento de área nesta época de cultivo e de seu reposicionamento espaço-temporal dentro dos limites da fazenda, ou seja, como a mesma se insere nos sistemas de produção vigentes, direcionaremos nossa discussão para a importância do tema ora em análise, focando o cultivo do algodoeiro em segunda safra. Somam-se a isto os maiores riscos de incidência de anomalias climáticas às que este cultivo está sujeito desde seu posicionamento, passando a ser semeado a partir do início de janeiro. A título ilustrativo, em uma área produtora significativa do Cerrado, a semeadura do algodoeiro de segunda safra tem sido iniciada a partir da primeira semana de janeiro, para os produtores que conseguiram semear cedo a soja precoce no ciclo anterior. Estes produto-

res muitas vezes já incorreram em algum grau de risco climático por terem efetuado a chamada “semeadura no pó”, referindo-se a semeadura da soja imediatamente após o fim do vazio sanitário da soja (15 de setembro para o Estado de Mato Grosso, por exemplo). Ao final deste período, é comum não haver umidade no solo adequada para suprir as exigências hídricas iniciais da soja; mas grandes grupos têm iniciado a semeadura de soja sob tais condições edafoclimáticas, a fim de conseguir colhê-la até os primeiros dias de janeiro, para, em seguida, efetuar a semeadura do algodão em segunda safra no “rastros da colheiteira”.

Entretanto, mesmo obtendo êxito com esta estratégia, o produtor não tem conseguido colher dentro do período previsto devido ao excesso de chuvas no fim do mês de dezembro e nas primeiras semanas de janeiro, sendo obrigado a protelar o início do período de semeadura. Como resultado, nas últimas estações de crescimento tem havido extensão do período de semeadura do algodoeiro em segunda safra, o que impõe a esta cultura maiores riscos climáticos, especialmente no que tange à deficiência hídrica durante o período de formação e crescimento de maçãs; quando a demanda hídrica do algodoeiro é máxima (*figura 1*).

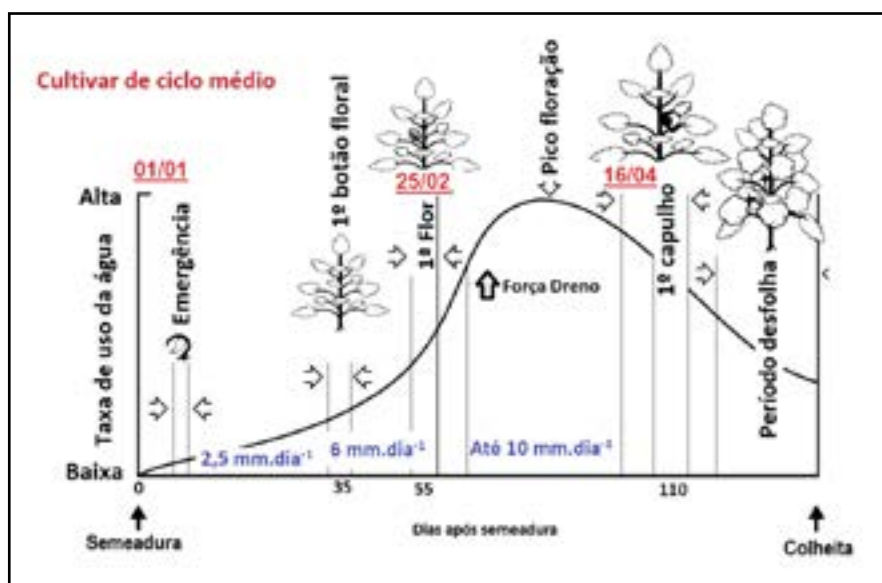


Figura 1. Demanda do algodoeiro por água em diferentes estádios fenológicos; esquema adaptado de McWilliams, 2003.

Este exemplo aplica-se ainda a outras áreas produtoras de Goiás e de Mato Grosso do Sul, também importantes produtores de pluma, que têm sido submetidos a tais anomalias climáticas nos últimos anos, especialmente nas áreas onde o algodoeiro insere-se no mesmo contexto, o de segunda safra. Por outro lado, outra preocupação vigente refere-se aos efeitos que

as condições edafoclimáticas historicamente ocorrentes em algumas áreas produtoras podem causar durante a fase reprodutiva do algodoeiro, cuja manipulação da época e arranjo de plantas na área podem determinar maior ou menor incidência e severidade de algumas doenças, por exemplo, de mofo-branco e podridão de maçãs. Nesse contexto e nessas áreas, tais aspectos também são importantes na definição da época de semeadura do algodoeiro.

O sistema de produção atual, em que se insere a cultura do algodão em áreas de Cerrado, e levando-se em conta as projeções futuras quanto às alterações nos elementos climáticos, colocamo-nos frente a um de nossos maiores desafios, que envolverá antever essas mudanças cada vez mais com maior exatidão e grau de certeza, de modo, a partir desse cenário, construir estratégias e táticas para a obtenção de genótipos mais adaptados e, ao mesmo tempo, definindo as estratégias de manejo mais adequadas para a cultura, melhorando assim a sustentabilidade de nossos agroecossistemas; somado a isto, ainda teremos de atentar-nos a uma maior demanda por alimentos e fibras resultante do crescimento vigente da população mundial. Para tal, a cooperação entre grupos de pesquisa com diferentes expertises, formando equipes cada vez mais multidisciplinares, aumentará nossas chances de êxito. E uma das grandes lacunas que surge como desafio para a pesquisa é o de reduzir o *gap* existente entre nossa capacidade atual de fenotipagem com a de genotipagem.

2. Fenotipagem morfofisiológica

É fato que há uma janela enorme entre as tecnologias disponíveis para a genotipagem e aquelas para a fenotipagem; entretanto, há, em termos globais, uma corrida para tentar reduzir a defasagem por meio de esforços despendidos por várias instituições de pesquisas públicas e privadas ou por meio da parceria entre essas. Estima-se que plataformas de fenotipagem em larga escala, como as mais recentemente divulgadas, revolucionarão os procedimentos envolvidos nessa tarefa laboriosa, e diria ainda arcaica, dos procedimentos de fenotipagem atualmente executados. Essas plataformas ainda propiciarão o aumento da escala, a dimensionalidade e a resolução espaço-temporal para estes procedimentos. Existe uma expectativa muito grande de que a aquisição e processamento de imagens revolucionem a fenotipagem em plantas, e mesmo as primeiras plataformas em testes demonstram que esta será uma ferramenta poderosa no futuro, especialmente útil aos procedimentos de seleção de plantas para os mais diversos fins, num contexto de melhoramento genético vegetal. Mesmo vislumbrando tais revoluções, estaremos sempre a preocupar-nos com a escolha daqueles caracteres morfofisiológicos analisados que correspondam a QTLs que respondam pela produtividade da cultura sob condições de deficiência hídrica, os quais podem ser de natureza constitutiva, ou seja, expressos mesmo sob condições em que a planta não esteja sob condição de estresse, ou respon-

sivos à deficiência hídrica, sendo expresso somente sob o estresse em questão. Importante ressaltar que enquanto os QTLs identificados a partir de caracteres induzidos em respostas ao déficit hídrico usualmente afetam o rendimento somente sob deficiência hídrica severa, aqueles identificados a partir de traços constitutivos podem afetar o desempenho da planta já em níveis baixos ou moderados de deficiência hídrica (Blum, 2006).

Quanto aos QTLs ligados a caracteres de adaptação à deficiência hídrica, a exemplo da acumulação de osmólitos protetores, realocação de carboidrato solúvel a partir de hastes e folhas, esses estão provavelmente relacionados à regulação da expressão de genes subjacentes em resposta à sinalização pelo acúmulo de ácido abscísico (ABA) (Bray, 2002), reforçado pela desidratação celular. De outro modo, sob condições adequadas de umidade no solo, a presença de QTLs ligados a caracteres classificados como constitutivos, mas de execução dificultada, como aqueles ligados ao sistema radicular, tal qual comprimento e volume de raízes, por exemplo, podem ser revelados pela co-localização de QTLs para outros traços indicativos, como o status hídrico da planta via determinação da concentração de ABA, da condutância estomática, do padrão de temperatura do dossel, do potencial hídrico foliar, da discriminação isotópica do carbono, entre outros (Reynolds et al., 2009; Brito et al., 2011; Elazab et al., 2012). Resultados evidenciam que os progressos obtidos, via melhoramento genético, durante o último século foram acompanhados por alterações em caracteres de expressão constitutiva, os quais afetam a evitância à desidratação em maior grau que aqueles responsivos à deficiência hídrica (Blum, 2005; 2006; 2011). Neste sentido, alguns autores têm enfatizado o desenvolvimento e uso de procedimentos para fenotipagem de caracteres constitutivos que aumentem o rendimento *per se* (Blum, 2009; Passioura, 2010; Brito et al., 2011) àquelas características relacionadas ao aumento da capacidade de sobrevivência da planta a estresses extremos, em vista de um possível efeito negativo em circunstâncias de estresse menos severo (Passioura et al., 2010; Sinclair, 2011).

Neste contexto, os caracteres a serem escolhidos como alvos potenciais para seleção de plantas para maior rendimento ou estabilidade de rendimento em condições de estresse devem ser geneticamente correlacionados com a produtividade e apresentar maior herdabilidade que o rendimento em si (Blum, 1988, 2011; Monneveux & Ribaut, 2006). Outros aspectos desejáveis referem-se à existência de variabilidade genética suficiente e ausência de caracteres indesejáveis relacionados aos principais componentes de rendimento. Deve-se optar preferencialmente pela mensuração daqueles que permitam sua quantificação de forma não destrutiva, com rápida obtenção, elevada acurácia e baixo custo.

Aspectos a serem considerados referem-se à possibilidade de efetuarem-se tais medições em um pequeno número de plantas por genótipo e sem a necessidade de morosos procedimentos de calibração de sensores para cada planta e no que diz respeito a optar-se preferencialmente por variáveis que possam ser integrativas ao longo de ciclo, ou parte deste, optando por medidas que permitam, por exemplo, a análise do dossel em vez de apenas uma

pequena área em uma única folha; assim provendo informações ao longo do ciclo da cultura. A partir desta etapa da discussão, vamos discorrer sobre alguns caracteres morfofisiológicos que têm sido investigados por diferentes grupos de pesquisa, devido a sua influência sobre o comportamento de plantas em condições de deficiência hídrica e/ou sobre a eficiência de uso da água. Em vez de abordarmos de forma mais generalizada as inúmeras técnicas de análise e discorrer sobre suas possibilidades e limitações, escolheremos aquelas que, a julgar pelas suas características, apresentam maior potencial para serem integradas aos programas de melhoramento genético; considerando o contexto em que estas técnicas serão inseridas e aos requisitos que terão de atender, considerando a dimensão e as diferentes etapas dos principais programas de melhoramento genético do algodoeiro no país.

2.1. Vigor Inicial

Vigor inicial poderá, sob determinadas condições, propiciar à planta a otimização de sua eficiência de uso da água e limitar sua perda por conta da evaporação direta da superfície do solo; especialmente sob condições de baixa demanda evapotranspiratória. Essa água presente nas folhas estará disponível para estágios de desenvolvimento subsequentes, durante a redução progressiva de umidade do solo, influenciando no rendimento potencial da cultura. Seu estabelecimento precoce também reduzirá a ocorrência de inibição da condutância estomática, via sinalização por ABA, e seu fluxo no xilema, muitas vezes ocasionado pelo estabelecimento de raízes esparsas e superficiais (Blum, 1996; Giuliani et al., 2005). De outro modo, o desenvolvimento excessivamente vigoroso do dossel poderá exaurir rapidamente a água armazenada ao longo do perfil do solo, acelerando sua exposição à deficiência hídrica em situações cuja demanda transpiratória seja elevada. Por esta razão, o grau ótimo de vigor inicial a ser buscado será determinado pelas características edafoclimáticas do ambiente-alvo. Este caráter tem sido explorado em diversas culturas, incluindo o algodoeiro, com o intuito de aumentar a eficiência de uso da água (Richards, 2006; Rebetzke et al., 2007).

2.2. Arquitetura do sistema radicular

As raízes podem exibir amplitude variável quanto a sua plasticidade morfológica em resposta às características físicas, químicas e biológicas do solo, a qual influenciará seu desempenho diante de situações de deficiência hídrica (Brito et al., 2011; Dhondt et al., 2013). Desse modo, o estabelecimento de um conceito para o desenvolvimento de um “ideótipo” para o sistema radicular deverá considerar os fatores que limitam a disponibilidade de água no solo e o custo metabólico sustentado pela planta para desenvolver e manter um sistema radicular mais vigoroso. Conseqüentemente, a contribuição da arquitetura radicular e de sua plasticidade fenotípica sobre o ganho de rendimento e/ou sua estabilidade de produção em condições de estresse, dentre outras, deverá levar em consideração a distribuição de umidade no perfil do solo e o nível de competição por água entre plantas adjacentes. Portanto, em uma dada condição em que exista água disponível

nas camadas mais profundas do perfil, a seleção de plantas que apresentem como característica o crescimento rápido de raízes e em profundidade poderia aumentar a capacidade da planta para absorver água nas camadas mais profundas, contribuindo para maior estabilidade de rendimento sob condições de deficiência hídrica.

Ao considerarmos as características químicas e estruturais dos solos de uma área significativa das regiões produtoras do Cerrado e, adicionalmente, associar tais características à época (historicamente do início da fase reprodutiva para o cultivo de segunda safra), duração e severidade dos veranicos ocorrentes, somos levados a crer que tal abordagem visando mitigar os efeitos causados pela distribuição sazonal de chuvas, a partir da seleção de genótipos com sistema radicular mais robusto, poderá, no futuro, resultar na obtenção de cultivares mais aptas a evitar o estresse e, portanto, propiciar maior estabilidade de rendimento no sistema de produção vigente.

Embora a importância de um sistema radicular profundo e vigoroso visando maior produtividade tenha sido reconhecida por diferentes autores e em diferentes culturas, como feijão (Mohamed et al., 2002), soja (Sadok & Sinclair, 2011), grão-de-bico (Varshney et al., 2011), milho (Landi et al., 2002; Giuliani et al., 2005; Bohn et al., 2006; Landi et al., 2007; Hochholdinger & Tuberosa, 2009; Rajhi et al., 2011), cevada (Hubick & Farquhar, 1989), trigo (Barraclough et al., 1989; Araus et al., 1993; Manschadi et al., 2008; Elazab et al., 2012) e arroz (Pantuwan et al., 2002; Centritto et al., 2009), esta ainda é uma abordagem bastante restrita, considerando que seu maior gargalo está em torná-la exequível para estudos em condições de campo. Existem diferentes técnicas que permitem estimar a massa de raízes e sua distribuição no perfil do solo, entretanto, estas técnicas são, em geral, altamente demandantes em recursos humanos e todas resultam na destruição de ao menos uma parte da unidade experimental (parcela) durante a coleta de amostras; além da sua inexequibilidade em experimentos de larga escala. Desse modo, discutiremos a seguir sobre algumas abordagens para a caracterização da arquitetura do sistema radicular enfocando suas vantagens e desvantagens. Em uma tentativa de avaliar a arquitetura de raízes em condições mais realísticas e em larga escala, a técnica conhecida como “Shovelomics” vem sendo empregada para investigar parâmetros relativos à arquitetura do sistema radicular no milho, cultivado em condições de campo (Trachsel et al., 2011). Outros métodos menos destrutivos, mas muito mais demandantes em tempo e recursos humanos, como a escavação, são utilizados para estimar a massa e distribuição radicular ao longo do perfil.

Nesse contexto, com o objetivo de contornar tais limitações, o emprego de minirhizotrons surge como uma alternativa aos métodos destrutivos para análise de raízes, permitindo sua avaliação *in situ* e visualização direta; além de propiciar condições para estudos da cinética de crescimento radicular (figura 2).

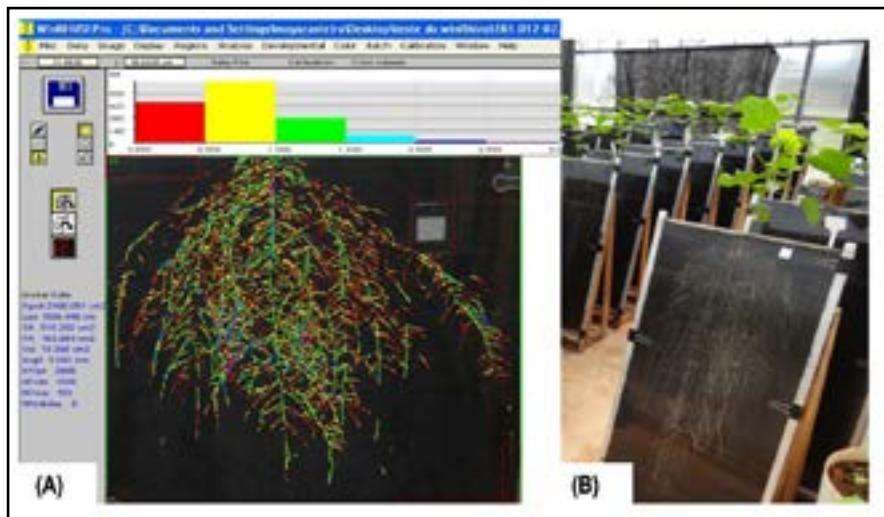


Figura 2. Saída de dados de arquitetura do sistema radicular via winRHIZO PRO 2013 à esquerda (A) e, à direita, a estrutura especialmente desenvolvida que permite a análise não destrutiva da arquitetura e a cinética de crescimento radicular (Brito et al. - artigo em construção).

Atualmente, estão sendo disponibilizados sistemas que permitem a análise a campo em condições menos invasivas, tais como as oferecidas por aquelas que se concretizam pela instalação de tubos de acesso no perfil do solo; acoplado a isso, estão softwares e scanners portáteis, que permitem a aquisição e análise da arquitetura e da cinética do sistema radicular em condições mais realísticas, se comparadas aos métodos destrutivos. Obviamente, não se trata de um sistema que se apresenta sem limitações; a começar que, durante a instalação desses tubos de acesso, os procedimentos em si causam alguma deformação ou distúrbios na estrutura do solo; o que poderá resultar na geração de artefatos durante a coleta e análises dos dados radiculares, reduzindo, portanto, a acurácia da abordagem. Assim, recomenda-se esperar alguns meses após sua instalação para dar início à coleta de imagens, de modo a permitir a re-colonização, pelas raízes, dos espaços ao redor dos tubos e permitir que os níveis de nutrientes retornem ao nível inicial, pré-distúrbio. Outro ponto a ser considerado refere-se à frequência de obtenção das imagens, que depende dos parâmetros a serem mensurados, do tempo requerido e dos recursos disponíveis para aquisição e extração dos dados.

A heterogeneidade estrutural e composicional do solo tem limitado a aquisição acurada de dados quanto às variáveis radiculares mensuradas, especialmente em experimentos conduzidos sob condições de campo. Assim, surgem como alternativa os dispositivos que permitem fenotipagem em condições controladas.

Esta abordagem propicia a análise mais rápida e precisa da arquitetura e da cinética de crescimento radicular de forma não destrutiva. De outro

modo, a maior limitação de estudos dessa natureza está na condição não realística em que as raízes crescem, sugerindo cautela na extrapolação dos resultados obtidos com aqueles encontrados no campo. Como exemplo, no milho, tem sido encontrada baixa correlação positiva entre caracteres de raízes seminais em plantas cultivadas em hidroponia e a expressão destas pelo mesmo genótipo crescendo no campo (Landi et al., 2007; Tuberosa et al., 2002). Com o intuito de tentar reduzir as condições irreais para o crescimento radicular, presente em cultivos hidropônicos, e contornar as limitações existentes em estudos sob condições de campo, surge como opção o cultivo de plantas em colunas ou câmaras de observação, comumente denominadas rizobox, que podem ser preenchidas com solo ou algum substrato adequado para o crescimento da espécie em questão. O cultivo em colunas ou em rizobox permite ainda a quantificação precisa de água para cada planta e sua taxa de uso e, por consequência, torna possível a mensuração da sua eficiência de uso. Em tais condições, é possível ainda estimar a capacidade das raízes em penetrar camadas compactadas, construídas de modo a simular condições comumente encontradas durante seu crescimento no campo (Cairns et al., 2004). Em arroz, por exemplo, a capacidade aumentada para romper camadas compactadas do perfil do solo é considerada um aspecto essencial para o desenvolvimento de raízes em profundidade, especialmente para os cultivos de terras altas (Fukai & Cooper, 1995), e tem papel preponderante no desempenho da planta em áreas onde o suprimento de água é limitado.

Abordagens que se utilizam de câmaras preenchidas com gel ou substrato, rolo de papel, microtomografia e imagens por ressonância magnética constituem em opções para investigar a arquitetura bidimensional e tridimensional de raízes e monitorar a cinética de crescimento radicular. Experimentos dessa natureza são particularmente úteis para a descoberta de QTLs constitutivamente expressos, influenciando, por exemplo, na angulação de raízes, influenciando sua arquitetura.

Considerando o contexto em que a fenotipagem de raízes foi apresentada neste tópico, com descrição de suas características, vantagens e limitações, permite-se àqueles profissionais diretamente interessados no tema vislumbrar tanto o aprimoramento das técnicas existentes quanto o desenvolvimento de novas, além de propiciar, com tais informações, a construção de estratégias e táticas, de modo a tornar compatíveis o uso de diferentes abordagens, dependendo do objetivo e do estágio a ser empregado dentro de um programa de melhoramento genético de plantas.

2.3. Tempo de florescimento

Em algumas espécies, o tempo de florescimento é considerado um fator crítico na adaptação, portanto, no rendimento, em ambientes-alvo, diferindo na disponibilidade e distribuição de chuvas ao longo do ciclo (Richards, 2006). Verrificam-se ainda associações positivas entre a plasticidade para a produtividade e o tempo de florescimento em diferentes níveis de disponibilidade hídrica e em diferentes espécies de interesse agrícola (Sadras et al., 2009). Isso nos leva a crer que, em adição aos aspectos relacionados à

fenologia *per se*, a exemplo do tempo requerido para um estágio fenológico, a plasticidade deve ser considerada como um caráter distinto influenciando a adaptação da cultura e o resultado de qualquer QTL em experimentos, em que os efeitos da fenologia sobre o rendimento não são reconhecidos ou contabilizados.

Esforços são dispensados na investigação das bases genéticas do tempo de florescimento, o que reflete sua importância econômica. Em culturas anuais, as bases genéticas do tempo de florescimento são mais complexas em espécies de clima temperado, a exemplo da cevada, do trigo, do centeio, quando comparadas a espécies tropicais como o arroz, sorgo, milho, entre outras, devido à presença, naquelas, de grupos gênicos relacionados à verbalização, influenciando o tempo de florescimento em resposta a baixas temperaturas (Salvi et al., 2011).

Se tomarmos como exemplo o algodoeiro para cultivo em segunda safra, nas condições edafoclimáticas do Cerrado, a seleção de genótipos quanto ao tempo de florescimento poderá ser interessante ou não, a depender das condições de clima e solo do ambiente-alvo e do seu posicionamento temporal, ou seja, da janela ótima para sua semeadura. De modo ilustrativo, nas regiões de menor altitude (maior temperatura média) e com ocorrência de chuvas historicamente até a primeira semana de abril, a seleção de genótipos para menor tempo de florescimento poderá propiciar melhores condições para a cultura durante uma fase crítica no que se refere à demanda de água. Por exemplo, se o produtor colher a soja da safra anterior até a primeira semana de janeiro e semear o algodão até o dia 15 de janeiro, empregando uma cultivar de ciclo médio; em tal cenário, o florescimento teria início aos 45-50 dias após a emergência, ou seja, primeira flor aberta ao redor de 10-15 de março. Neste exemplo hipotético, na segunda quinzena de março, historicamente teríamos em média 107 milímetros de chuvas, somados aos 70 milímetros do mês de abril. Entretanto, devemos considerar que cerca de 80% desse total de abril ocorre na primeira semana do mês (Série histórica - Agritempo). Assim, assumindo uma demanda diária entre 6-8 mm de água pela cultura, durante os próximos 55-60 dias após a abertura da primeira flor, torna-se bastante evidente o déficit hídrico progressivo imposto à cultura durante seu período. Portanto, em tais condições, a seleção para o encurtamento do período de florescimento e rápido crescimento de maçãs poderá impactar positivamente sobre a produtividade, pela estratégia de escape ao período de deficiência hídrica progressiva.

Por outro lado, se tomarmos como exemplo as áreas recentemente incorporadas ao cultivo do algodão, os chamados chapadões, onde o índice de chuvas é maior e historicamente elas estendem-se até o final de abril e, muito comumente, até a primeira semana de maio, o déficit hídrico enfrentado pela cultura sob tais condições é menor, considerando a mesma época de semeadura do exemplo anterior. Por outro lado, em tais regiões, é comum a ocorrência de veranicos, que variam entre 7 e 15 dias durante este período crítico, voltando a chover logo em seguida. Em tais condições, a seleção de genótipos com certa plasticidade quanto à extensão do período de florescimento poderá ser interessante. Concluindo, em virtude da complexidade

dos mecanismos de respostas da planta à deficiência hídrica, associada à mais diferentes combinações de ambientes-alvo para o algodoeiro no Cerrado, fica evidente que a escolha da estratégia de seleção para o tempo de florescimento deverá levar em conta os aspectos acima mencionados.

3. Discriminação isotópica do carbono

A discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) quantifica a taxa de isótopos estáveis de carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) presentes na matéria seca da folha, hastes e grãos de uma planta em comparação à taxa presente na atmosfera. Esta técnica surge como uma estratégia complementar para seleção de plantas visando maior desempenho e/ou estabilidade de produção em resposta ao déficit hídrico. Esta abordagem surge como alternativa aos procedimentos rotineiramente empregados, procurando reduzir o tempo requerido na seleção de plantas junto aos programas de melhoramento que buscam a seleção de genótipos com desempenho superior em resposta à deficiência hídrica.

A $\Delta^{13}\text{C}$ tem sido empregada como um indicador indireto da eficiência de uso da água (EUA) (Farquhar et al., 1989; Brito et al., 2011; Elazab et al., 2012) e correlaciona-se com a tolerância à deficiência hídrica (Centritto et al., 2009; Elazab et al., 2012). Mensurações da $\Delta^{13}\text{C}$ em folhas e grãos têm sido extensivamente usadas como um indicador da EUA em várias espécies de interesse agrícola (Farquhar & Richards, 1984). A associação da $\Delta^{13}\text{C}$ e da EUA está baseada no conceito de que ambas são funcionalmente dependentes da concentração de CO_2 intracelular (c_i) (Farquhar et al., 1989). Estabeleceu-se ainda que a extensão em que uma planta C_3 discrimina contra ^{13}C poderá determinar sua EUA. Portanto, tal princípio leva-nos a acreditar que, por conta da correlação entre $\Delta^{13}\text{C}$ e valores de trocas gasosas, tal abordagem possa ser empregada como um marcador relativo ao desempenho da planta quanto a suas taxas de trocas gasosas e, conseqüentemente, influenciando no resultado final para seus componentes de rendimento (Farquhar et al., 1982; Brito et al., 2011, 2014). O desempenho de um determinado genótipo para a $\Delta^{13}\text{C}$ poderá refletir sobre seu desempenho em termos de assimilação de CO_2 e eficiência na taxa de transpiração.

De posse destes conceitos, o geneticista poderá lançar mão desta abordagem visando a seleção de genótipos superiores quanto a sua tolerância à deficiência hídrica ou maior EUA, como um marcador de seleção, sem a necessidade de muitos anos de trabalho laborioso, altamente demandante em recursos humanos e de custo elevado, como são os procedimentos corriqueiramente utilizados em condições de campo para com tal finalidade. Por apresentar alta variabilidade genética em espécies C_3 e elevada herdabilidade, a $\Delta^{13}\text{C}$ torna-se atrativa ao melhoramento genético visando maior EUA e produtividade.

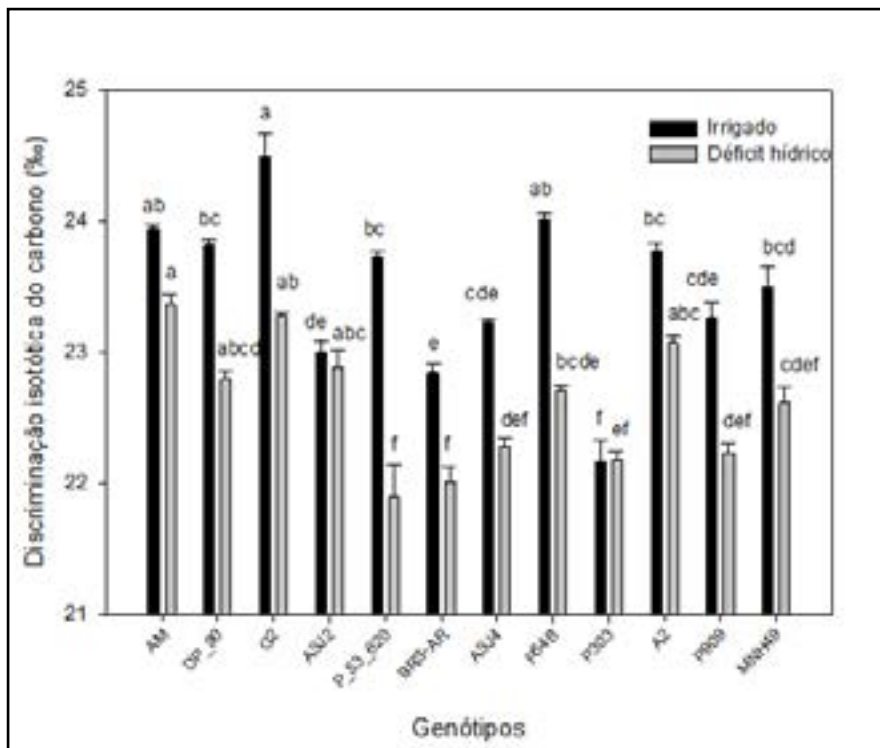


Figura 3. Discriminação isotópica média em 12 genótipos de algodoeiro submetidos à deficiência hídrica na emissão da primeira flor aberta; cultivados sob condições controladas. Amostras foliares foram coletadas para análise quando as plantas do tratamento estressado atingiram -2,0 MPa na antemanhã (Brito et al., 2014).

4. Condutância estomática

A condutância estomática (g_s) desempenha papel preponderante, regulando o balanço hídrico e determinando a taxa de $\Delta^{13}C$ e, por conseguinte, a EUA (Richards et al., 2006; Sinclair et al., 2008; Brito et al., 2011). Vários estudos evidenciam tal importância para g_s , especialmente um estudo retrospectivo, o qual demonstrou que as cultivares de trigo lançadas pelo CIMMYT entre 1962 e 1988 apresentam forte correlação entre g_s e produtividade de grãos ($r = 0,94$) (Fischer et al., 1998), indicando a possibilidade do emprego de g_s como ferramenta de seleção indireta de plantas com maior potencial de rendimento.

Embora haja atualmente uma corrida pela obtenção de ferramentas de análise fisiológica não destrutiva, é importante ressaltar que mesmo se encaixando neste quesito, g_s possui natureza peculiar; sendo altamente labo-

riosa, de difícil acurácia sob condições de campo e em especial para grande número de genótipos, em razão de flutuações ambientais que ocorrem ao longo de um procedimento de avaliação, que podem afetar a *gs* no decorrer do período de avaliação, determinando que alguns cuidados sejam tomados de modo a reduzir tais efeitos sobre a precisão das medidas obtidas. Dentre os principais, mencionamos aqueles relativos à janela de tempo mais adequada para tais avaliações, optando por períodos nos quais as variações nas condições atmosféricas sejam as menores possíveis, que oscilarão em função de cada região; nas regiões produtoras do sudoeste goiano, por exemplo, o período compreendido entre 12h e 14h é o que tem se mostrado o mais adequado para se mensurar o desempenho de diferentes genótipos em condições de campo. Como exposto no exemplo anterior, essa janela de duas horas limita a possibilidade de emprego da ferramenta para análises em larga escala, pré-requisito em programas de melhoramento, dependendo da fase em que se deseja empregá-la. A seguir, evidencia-se a existência de variabilidade genética para a condutância estomática (*figura 4*).

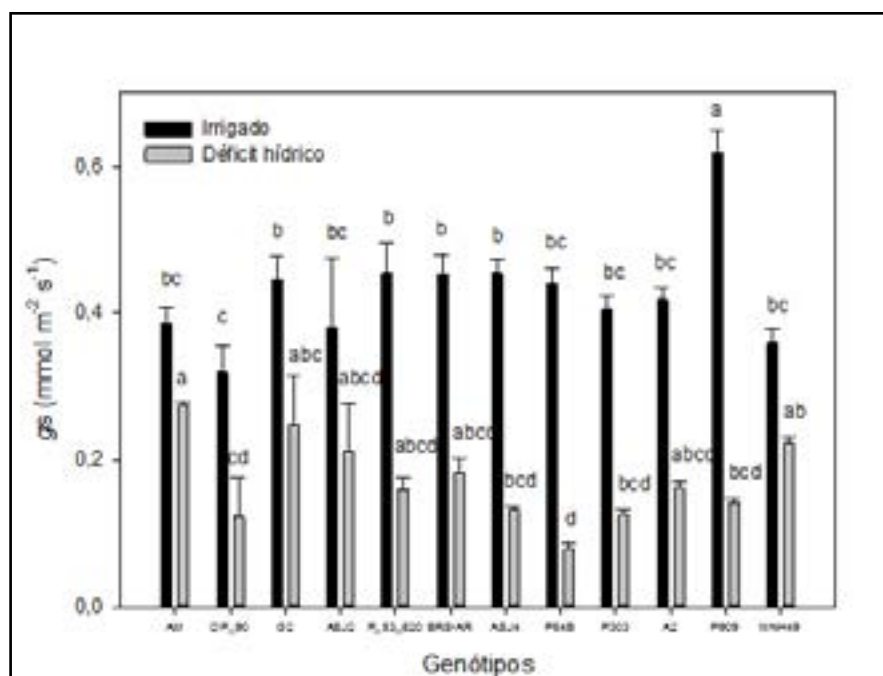


Figura 4. Condutância estomática (*gs*) média em 12 genótipos de algodoeiro submetidos à deficiência hídrica na emissão da primeira flor aberta; cultivados sob condições controladas. Amostras foliares foram coletadas para análise quando as plantas do tratamento estressado atingiram potencial hídrico foliar de -2,0 MPa na antemanhã (Brito et al., 2014).

A $\Delta^{13}\text{C}$ surge como alternativa para tentar contornar tais limitações e vislumbrar a possibilidade de obtenção de medidas mais integrativas para tal variável. Ao considerarmos o papel desempenhado pela concentração de CO_2 intracelular (c_i) (Farquhar et al., 1989) no fracionamento isotópico e na EUA, deduz-se que, devido à correlação entre $\Delta^{13}\text{C}$ e valores de trocas gasosas, tal abordagem possa ser empregada como um marcador fisiológico do desempenho da planta quanto às suas taxas de trocas gasosas e, conseqüentemente, influenciando no resultado final para seus componentes de rendimento (Farquhar et al., 1984; Brito et al., 2011, 2014). Embora o emprego da $\Delta^{13}\text{C}$ configure-se em uma alternativa e apresente claramente algumas vantagens em relação a outros métodos para monitoramento do desempenho da planta quanto às suas trocas gasosas, alguns fatores devem ser considerados para sua adoção e inclusão como uma ferramenta junto aos programas de melhoramento genético; a começar pelo seu ainda elevado custo, da relevância da EUA como mecanismo de tolerância à deficiência hídrica, da importância da fenologia, da condutividade hidráulica e da variação do fracionamento isotópico no interior do dossel.

Ajuste osmótico

O ajuste osmótico (AO) representa o resultado de uma resposta metabólica envolvendo o acúmulo intercelular de solutos em resposta à deficiência hídrica (Tripathy et al., 2000), considerando o estresse aqui abordado. Este processo progride na medida em que há um declínio da umidade do solo; como a umidade reduz, aqueles genótipos com capacidade de ativar a síntese de osmólitos compatíveis e orquestrar seu balanço intracelular poderão manter níveis mais elevados de turgescência, o que influirá na integridade de funções metabólicas. A elevada capacidade de um genótipo para efetuar o AO tem sido associada a sua maior estabilidade de rendimento em condições de estresse. Exemplos dessa natureza foram verificados em várias espécies, incluindo o algodoeiro (Saranga et al., 2001). Por outro lado, a usabilidade como caráter alvo para seleção de genótipos sob deficiência hídrica tem sido questionada (Munns, 1988; Palta et al., 2007), ao considerar que, em alguns casos, genótipos com elevada capacidade para ajustar-se osmoticamente são associados à baixa taxa de crescimento e ao acúmulo de biomassa, em virtude do custo metabólico despendido pela planta na biossíntese de osmólitos compatíveis. É fato que, para plantas submetidas a déficit hídrico severo, uma maior capacidade para efetuar o AO permitirá à planta suportar um período maior de estresse e recuperar-se mais rapidamente após a ocorrência de uma chuva, por exemplo. Entretanto, os requerimentos metabólicos para este processo ativo poderão ser dispendiosos para a planta; por esta razão, a adoção deste caráter nos procedimentos de seleção deverá levar em consideração a espécie em estudo, a dinâmica e a severidade dos episódios de estresse.

Embora se tenha experimentado abordar apenas algumas variáveis relacionadas às respostas morfofisiológicas da planta ao déficit hídrico, é importante ressaltar que nos encontramos atualmente em um estágio de evolução da fenômica, que nos coloca face a face com questões contrastantes;

primeiramente, por estarmos buscando simplificar o sistema com o intuito de compreender sua função, ou seja, a partir de uma perspectiva reducionista. Num segundo momento, pretendemos utilizar tal descoberta em um contexto agrônomo e de melhoramento genético, ou seja, sob a perspectiva holística. Nesse contexto mais amplo, interações fisiológicas e epistáticas estarão ocorrendo, além de efeitos pleiotróficos de caráter complexo, que inevitavelmente limitam e obscurecem a identificação dos principais fatores responsáveis por um fenótipo específico. Sob esta ótica, esforços são dispensados em aproximações reducionistas, vislumbrando a compreensão de todo esse quebra-cabeça em um estágio em que ainda dispomos somente de poucas peças.

De outro modo, uma aproximação holística que procura selecionar, por exemplo, por meio do desempenho da produtividade *per se*, propicia-nos visualizar a figura final do quebra-cabeça, ou seja, o fenótipo, sem, no entanto enxergarmos cada peça isoladamente e muito menos conhecer como elas interagem e influenciam-se no resultado final, ou seja, no seu desempenho final, quando submetidas ao estresse em questão. A julgar por estas colocações, o aprimoramento contínuo e o desenvolvimento de novas plataformas de fenotipagem que nos permitam melhorar a dimensionalidade, a resolução espaço-temporal, associada à possibilidade de análises em larga escala, do aumento do grau de compreensão de processos em geral, propiciará estabelecermos as estratégias e as táticas mais adequadas para cada ambiente-alvo do melhoramento para a obtenção de cultivares cada vez mais adaptadas a um cenário de incertezas climáticas.

No estágio atual, considerando a disponibilidade de plataformas para genotipagem em larga escala a custos e tempo cada vez menores, e a indisponibilidade para tal com respeito à fenotipagem, gastam-se grandes esforços, que culminarão, nos próximos anos, na disponibilidade de novas alternativas, de modo a estreitar o *gap* atualmente existente entre estas aproximações complementares e fundamentais dentro dos programas de melhoramento genético. Adicionalmente, a escolha, a caracterização e o uso do germoplasma existente serão fundamentais dentro da busca por maior tolerância à deficiência hídrica no futuro. Aliado a isso, aproximações relativas à fisiologia vegetal, integrando-a às demais áreas do conhecimento, serão fundamentais para compreender as lacunas ainda existentes sobre os mecanismos de que as plantas se valem para responder à deficiência hídrica e como estas vias interagem; além de contribuir para a compreensão das bases genéticas funcionais de caracteres relacionados à adaptação à deficiência hídrica.

Nesse contexto, investimentos instrumentais que permitam melhorar nossa capacidade de fenotipar em larga escala, e com maior precisão, terão importância preponderante, reduzindo o tempo requerido para cada etapa do processo e os procedimentos laboriosos altamente demandantes em recursos humanos, atualmente em uso. Essa maior resolução em termos de fenotipagem permitir-nos-á vislumbrar uma maior acurácia e, portanto, tornar mais robusta nossa aproximação estatística, a qual tem afetado, sobremaneira, a capacidade de marcadores em explicar apropriadamente o

fenótipo encontrado e o potencial de uso para novas combinações de genes em procedimentos de pirâmidação.

Referências bibliográficas

ARAUS, J. L.; BROWN, H. R.; FEBRERO, A.; BORT, J.; SERRET, M. D. Ear Photosynthesis, Carbon Isotope Discrimination and the Contribution of Respiratory CO₂ to Differences in Grain Mass in Durum-Wheat. **Plant Cell and Environment**, v.16, p.383-392, 1993.

BARRACLOUGH, P. B.; KUHLMANN, H.; WEIR, A. H. The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.163, 1989.

BLUM, A. **Plant Breeding for Water-Limited Environments**. New York, NY: Springer, 2011.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under water deficit stress. **Field Crops Research**, v. 112, n. 2-3, p. 119-123, 2009.

BLUM, A. “**Drought adaptation in cereal crops: a prologue**”. In: Drought Adaptation in Cereals, RIBAUT, J. M. (ed.) Binghamton-NY: The HaworthPress, Inc., p. 3-15, 2006.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Australian Journal of Agricultural Research**. p. 56, p. 1159-1168, 2005.

BLUM, A. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. **Plant Growth Regulation**. v. 20, p. 135-148, 1996.

BLUM, A. **Breeding for Stress Environments**. Boca Raton: CRC Press, 245, 1988.

BOHN, M.; NOVAIS, J.; FONSECA, R.; TUBEROSA..., R. Genetic evaluation of root complexity in maize. **Acta Agronomica ...**, 2006.

BOYER, J. S. Measuring the Water Status of Plant sand Soils. London, UK: Academic Press, 178p, 1995.

BRAY, E. A. Abscisic acid regulation of gene expression during water-deficit stress in the era of the Arabidopsis genome. **Plant Cell Environment**. v. 25, p. 153-161, 2002.

BRITO, G. G.; SUASSUNA, N. D.; SOFIATTI, V.; DIOLA, V.; MORELLO, C. L. Leaf $\delta^{13}C$ -level carbon isotope discrimination and its relationship with yield components as a tool for cotton phenotyping in unfavorable conditions. **Acta Scientiarum -Agronomy**, v. 36, n. 3, July-Sept., 2014.

BRITO, G. G.; SOFIATTI, V.; LIMA, M. M. D.; DE CARVALHO, L. P.; DA SILVA, J. L. Physiological traits for water deficit phenotyping in cotton. **Acta Scientiarum -Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 117-125, 2011.

CAIRNS, J. E.; AUDEBERT, A.; TOWNEND, J.; PRICE, A. H.; ANDMULLINS, C. E. Effect of soil mechanical impedance on root growth of two rice varieties under field drought stress. *Plant Soil* v. 267, p. 309-318, 2004.

CENTRITTO, M.; LAUTERI, M.; MONTEVERDI, M. C.; SERRAJ, R. Leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, and grain yield in contrasting rice genotypes subjected to water deficits during the reproductive stage. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 8, p. 2325-2339, 2009.

CHAPMAN, S.; COOPER, M.; PODLICH, D.; HAMMER, G. Evaluating plant breeding strategies by simulating gene action and dry land environment effects. **Agronomy Journal**. v. 95, p. 99-113, 2003.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Séries Históricas Relativas às Safras 1976/77 a 2012/2013 de Área Plantada, Produtividade e Produção**. 2013. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=>>.

CUADRA, S. V.; COSTA, M. H.; KUCHARIK, C. J.; DA ROCHA, H. R.; TATSCH, J. D.; INMAN-BAMBER, G.; DA ROCHA, R. P.; LEITE, C. C.; CABRAL, O. M. R. A biophysical model of sugarcane growth. **GCB Bioenergy**, 4(1), 36-48.2012.

DHONDT, S.; WUYTS, N.; INZÉ, D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends in plant science**, v.18, p.428-439, 2013.

ELAZAB, A.; MOLERO, G.; SERRET, M. D.; ARAUS, J. L. Root traits and $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ of durum wheat under different water regimes. **Functional Plant Biology**, v. 39, n. 5, p. 379-393, 2012.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon Isotope Discrimination and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 40, p. 503-537, 1989.

FARQUHAR, G. D.; RICHARDS, R. A. Isotopic Composition of Plant Carbon Correlates with Water-Use Efficiency of Wheat Genotypes. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 11, n. 6, p. 539-552, 1984.

FARQUHAR, G. D., O'LEARY, M. H.; BERRY, J. A. On the relationship between

carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Austral. J. Plant Physiol.** 9:121-137. 1982.

FISCHER, R. A.; REES, D.; SAYRE, K. D.; LU, Z. M.; CONDON, A. G.; LARQUE SAAVEDRA, A. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate and cooler canopies. **Crop Science.** v. 38, p. 1467-1475, 1998.

FLOOD, P. J.; HARBINSON, J.; AARTS, M. G. M. Natural genetic variation in plant photosynthesis. **Trends in Plant Science,** v. 16, n. 6, p. 327-335, 2011.

FUKAI, S.; COOPER, M. Development of drought resistant cultivars using phenomorphological traits in rice. **Field Crops Research.** v. 40, p. 67-86, 1995.

GIULIANI, S.; SANGUINETI, M. C.; TUBEROSA, R.; BELLOTTI, M.; SALVI, S.; LANDI, P. Root-ABA1, a major constitutive QTL, affects maize root architecture and leaf ABA concentration at different water regimes. **Journal Experimental of Botany.** v. 56, p. 3061-3070, 2005.

HOCHHOLDINGER, F.; TUBEROSA, R. Genetic and genomic dissection of maize root development and architecture. **Current opinion in plant biology,** v.12, p.172-177, 2009.

HUBICK, K.; FARQUHAR, G. Carbon Isotope Discrimination and the Ratio of Carbon Gained to Water Lost in Barley Cultivars. **Plant Cell and Environment,** v.12, p.795-804, 1989.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. MILLER, H. L. (Eds.). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,** Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.p. 1-18.

INMET. **Dados da Rede do INMET.** Dados do período compreendido entre Novembro de 1971 e junho de 2013, 2013. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

KLOTH, R. H.; TURLEY, R. B. Physiology of seed and fiber development. In: STEWART, J. M.; OOSTERHUIS, D. M., et al (Ed.). **Physiology of Cotton.** London New York: Springer Dordrecht Heidelberg, 2010. p. 111-122.

LANDI, P.; SANGUINETI, M.; DARRAH, L.; GIUHANI, M.; SALVI, S.; CONTI, S.; TUBEROSA, R. Detection of QTLs for vertical root pulling resistance in maize and overlap with QTLs for root traits in hydroponics and for grain yield under different water regimes. **Maydica,** v.47, p.233-243, 2002.

LANDI, P.; SANGUINETI, M.; LIU, C.; LI, Y.; WANG, T.; GIULIANI, S.; BELLOTTI, M.; SALVI, S.; TUBEROSA, R. Root-ABA1 QTL affects root lodging, grain yield, and other agronomic traits in maize grown under well-watered and water-stressed conditions. **Journal of experimental botany**, v.58, p.319-326, 2007.

LEIDI, E. O., LOPEZ, M.; GORHAM, J.; GUTIERREZ, J. C. Variation in carbon isotope discrimination and other traits related to water deficit tolerance in upland cotton cultivars under dry land conditions. **Field Crops Research**, v. 61, p. 109-123, 1999.

LEVITT, J. Responses of Plants to Environmental Stresses. New York, NY: Academic Press, 698p., 1972.

LU, Z.; CHEN, J.; PERCY, R. G.; SHARIFI, M. R.; RUNDEL, P. W.; ZEIGER, E. Genetic variation in carbon isotope discrimination and its relation to stomatal conductance in Pima cotton (*Gossypium barbadense* L.). **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 23, p. 127-132, 1996.

MCWILLIAMS, D. **Drought Strategies for Cotton**. Cooperative Extension Service, Circular 582, College of Agriculture and Home Economics, New Mexico State University, 2003.

MANSCHADI, A.; HAMMER, G.; CHRISTOPHER, J. Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant and Soil**, 2008.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change** v.117, p. 227–239, 2013.

MOHAMED, M. F.; KEUTGEN, N.; TAWFIKA, A. A.; NOGA, G. Dehydration-avoidance responses of tepary bean lines differing in drought resistance. **Journal of plant physiology**, v.159, p.31-38, 2002.

MONNEVEUX, P.; RIBAUT, J. M. “**Secondary traits for drought tolerance improvement in cereals**”. In: Drought Adaptation in Cereals, ed. Ribaut, J.-M. (Binghamton, NY: The Haworth Press, Inc), p. 97-143, 2006.

MUNNS, R. Why measure osmotic adjustment? **Australian Journal of Plant Physiology**. v. 15, 717-726, 1988.

PALTA, J. A., TURNER, N. C., FRENCH, R. J., BUIRCHELL, B. J. Physiological responses of lupin genotypes to terminal drought in Mediterranean-type environment. *Ann. Appl. Biol.* 150, 269–279. 2007.

PANTUWAN, G.; FUKAI, S.; COOPER, M.; RAJATASEREKUL, S.; O'TOOLE, J. Yield response of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to drought under rainfed

lowland: 3. Plant factors contributing to drought resistance. **Field Crops Research**, v.73, p.181-200, 2002

PASSIOURA, J. B. Drought and drought tolerance. **Plant Growth Regulation**. v. 20, p. 79-83, 1996.

PASSIOURA, J. B. The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. **Journal Experimental of Botany**. p. 58, v. 113-117, 2007.

PASSIOURA, J. B. Scaling up: the essence of effective agricultural research. **Functional Plant Biology**. v. 37, p. 585-591, 2010.

RADIN, J. W.; LU, Z. M.; PERCY, R. G.; ZEIGER, E. Genetic-Variability for Stomatal Conductance in Pima Cotton and Its Relation to Improvements of Heat Adaptation. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, n. 15, p. 7217-7221, 1994.

RAJHI, I.; YAMAUCHI, T.; TAKAHASHI, H.; NISHIUCHI, S.; SHIONO, K.; WATANABE, R.; MLIKI, A.; NAGAMURA, Y.; TSUTSUMI, N.; NISHIZAWA, N. K.; NAKAZONO, M. Identification of genes expressed in maize root cortical cells during lysigenous aerenchyma formation using laser microdissection and microarray analyses. **The New phytologist**, v.190, p.351-68, 2011.

REBETZKE, G. J.; ELLIS, M. H.; BONNETT, D. G.; RICHARDS, R. A. Molecular mapping of genes for coleoptile growth in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theoretical Applied Genetics*. v. 114, p. 1173-1183, 2007.

REYNOLDS, M., TUBEROSA, R. Translational research impacting on crop productivity in drought prone environments. **Current Opinion in Plant Biology**. v. 11, p. 171-179, 2008.

REYNOLDS, M.; MANES, Y.; IZANLOO, A. Langridge, P. Phenotyping approaches for physiological breeding and gene discovery in wheat. **Annals of Applied Biology**. p. 155, p. 309-320, 2009.

RICHARDS, R. A. Defining selection criteria to improve yield under drought. **Plant Growth Regulation**. v. 20, p. 157-166, 1996.

RICHARDS, R. A. Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water scarce environments. **Agricultural Water Management**. v. 80, p. 197-211, 2006.

SADOK, W.; SINCLAIR, T. R. 7 Crops Yield Increase Under Water-Limited Conditions: Review of Recent Physiological Advances for Soybean Genetic Improvement. **Advances in Agronomy**, v.113, p.313, 2011.

SADRAS, V. O.; REYNOLDS, M. P.; LAVEGA, A. J.; PETRIE, P. R. ROBINSON, R.

Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat, sunflower and grapevine. **Field Crops Research**. v. 110, p. 242-250, 2009.

SALVI, S.; CORNETI, S.; BELLOTTI, M.; CARRARO, N.; SANGUINETI, M. C.; CASTELLETTI, S. R. (2011). Genetic dissection of maize phenology using an intraspecific introgression library. **BMC Plant Biol.** 11, 4.

SARANGA, Y.; MENZ, M.; JIANG, C. X.; WRIGHT, R. J. YAKIR, D.; PATERSON, A. H. Genomic dissection of genotype \times environment interactions conferring adaptation of cotton to arid conditions. **Genome Research**. v. 11, p. 1988-1995, 2001.

SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C.; SNELLER, C. H. Crop transformation and the challenge to increase yield potential. **Trends in Plant Science**, v. 9, n. 2, p. 70-75, 2004.

SINCLAIR, T. R. Challenges in breeding for yield increase for drought. **Trends in Plant Science**. v. 16, p. 289-293, 2011.

TRACHSEL, S.; KAEPPLER, S. M.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Shovelomics: high-throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field *Plant Soil* v. 341, p. 75-87, 2011.

TRIPATHY J. N.; ZHANG, J.; ROBIN, S.; NGUYEN, TH. T.; NGUYEN, H. T. QTLs for cell-membrane stability mapped in rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. *Theor Appl Genet*, 100:1197–1202. 2000.

ZHU, J.K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 53, p. 247-273, 2002.

ZHU, X.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 235-261, 2010.

CAPÍTULO 4 ESTRESSE NUTRICIONAL

Nutrição e estresses nutricionais em algodoeiro

Ciro A. Rosolem

FCA/Unesp

Júlio C. Bogiani

Embrapa Algodão

Nutrientes são absorvidos pelo algodoeiro praticamente durante todo o ciclo, e a quantidade depende do desenvolvimento da cultura e da carga pendente. Na *tabela 1*, apresenta-se uma estimativa, obtida em lavouras australianas produzindo de 1.800 a 2.400 kg ha⁻¹ de pluma. Ao contrário do que havia sido determinado no Brasil, o aumento na absorção e também na exportação não é exatamente proporcional ao aumento na produção. Ou seja, quanto maior a produtividade parece ser menor a eficiência da planta em utilizar o nutriente. Tomando-se como exemplo o nitrogênio, para produzir 1.000 kg ha⁻¹ de pluma, o algodoeiro consumiu 63 g de N por kg de pluma. No entanto, para produzir 1.800 kg ha⁻¹ ou 2.400 kg ha⁻¹, os consumos foram de 97 g e 121 g de N por kg de pluma, respectivamente. Por esta razão, a economicidade da adubação deve sempre ser levada em conta, uma vez que, a cada incremento na dose de fertilizante, o incremento na produtividade será um pouco menor.

Tabela 1. Quantidades de nutrientes absorvidos e exportados em relação à produtividade, na Austrália (adaptado de Rochester, 2007).

Nutrientes	Produção de pluma (kg/ha)								
	1.000	1.800	2.400	1.000		1.800		2.400	
	Absorção			Exportação					
	kg/ha			kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%
Nitrogênio	63	175	290	42	66	91	52	133	46
Fósforo	13	27	41	10	82	19	69	25	60
Potássio	77	167	250	16	21	28	17	38	15
Enxofre	10	39	62	4	42	8	21	11	18
Cálcio	71	94	155	2	3	3	3	3	2
Magnésio	16	36	63	7	45	12	34	16	25
Ferro	0,227	0,820	1,620	0,091	40	0,328	17	0,178	11
Manganês	0,152	0,355	0,655	0,008	5	0,011	3	0,013	2
Boro	0,075	0,320	0,560	0,017	22	0,070	13	0,062	11
Cobre	0,025	0,052	0,081	0,013	51	0,020	38	0,251	31
Zinco	0,058	0,119	0,203	0,057	99	0,087	73	0,123	61

Por outro lado, quando se olha para as quantidades que são exportadas, à medida que aumenta a produtividade, a proporção de nutrientes exportada diminui. Isso é muito importante, por exemplo, no caso do P, que em produtividades de 1000 kg ha⁻¹ têm 82% da quantidade absorvida exportada, ao passo que, na maior produtividade, a exportação, embora maior em quantidade, representa 60% da absorção. Tomando-se as quantidades exportadas por kg de fibra, chega-se a 42, 50 e 55 g, uma situação bem menos crítica do que quando se considera a absorção de nutrientes. Assim, embora a exigência inicial de lavouras de algodão de alta produtividade seja muito grande, não guardando proporcionalidade com o aumento da produtividade, a proporção dos nutrientes que é reciclada para o solo é também maior. Desta forma, lavouras de alta produtividade acabam, ao longo do tempo, sendo quase tão eficientes no uso dos nutrientes que produtividades um pouco menores, uma vez que é aumentada a ciclagem dos minerais.

As taxas de absorção diária de nutrientes aumentam muito desde o início do florescimento até a frutificação, diminuindo à medida que as maçãs amadurecem (Mullins e Burmester, 2010). Normalmente, o pico de máxima absorção ocorre de duas a três semanas após o início do florescimento (metade do período de florescimento).

Para alguns nutrientes, o teor nas folhas diminui com a idade da folha e da planta, enquanto aumenta para outros (*figura 1*).

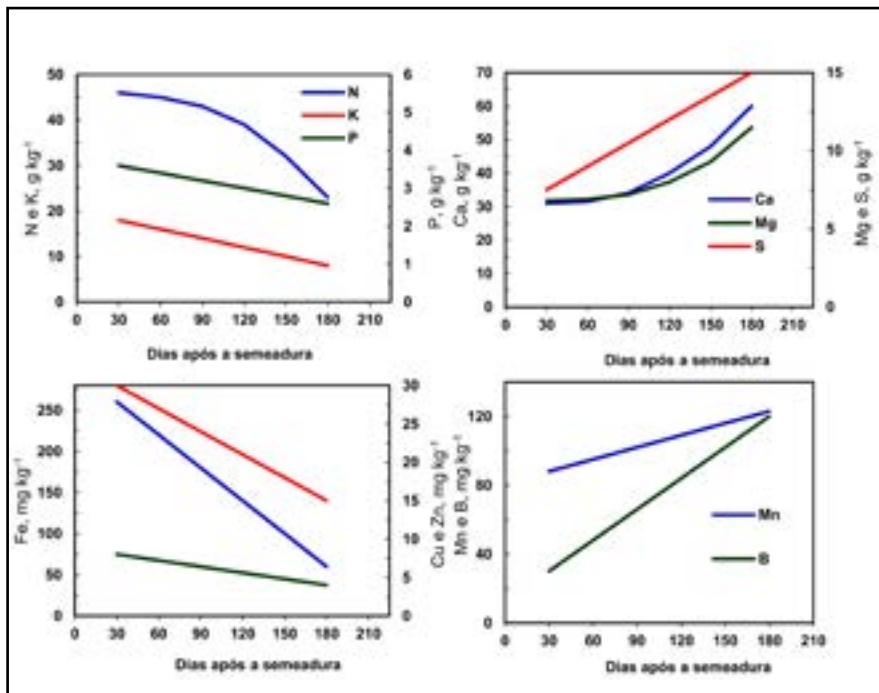


Figura 1. Mudança nos teores de nutrientes em folhas de algodão durante o crescimento de uma lavoura de alta produtividade, irrigada, na Austrália. Adaptado de Rochester et al. (2012).

Normalmente, os teores de N, P, K, Fe, Cu e Zn diminuem com a idade, uma vez que são móveis ou moderadamente móveis na planta, enquanto os teores de Ca, Mg, S e B, que praticamente não são redistribuídos na planta, aumentam. Para o nitrogênio, por exemplo, Thompson et al. (1976) demonstraram que a concentração na folha diminuiu de $60\ g\ kg^{-1}$ para $20\ g\ kg^{-1}$ dos 40 aos 60 dias de idade da planta. Uma quantidade típica de N exportada das folhas seria de aproximadamente 50%. Esse comportamento é importante na definição de quando amostrar as folhas para a diagnose foliar, pois o resultado somente será comparável e terá valor diagnóstico, se a amostragem for semelhante à amostra de referência.

1. Nitrogênio

O nitrogênio é transportado até as raízes do algodoeiro principalmente por fluxo de massa. Isto é, o nutriente é transportado no solo com a massa de água que se movimenta em direção às raízes em função da transpiração da planta. Assim, se a planta não estiver transpirando, ou houver pouca água no solo, a aquisição de N será prejudicada.

Normalmente, as folhas são a maior fonte de N para as maçãs (Rosolem e Mikkelsen, 1989). No total da planta, estima-se que aproximadamente 40% do N encontrado nos frutos foi retranslocado das partes vegetativas da planta, mas essa proporção não é constante durante o ciclo: o N para os primeiros frutos é suprido, em boa parte, diretamente da absorção do solo, enquanto que o N suprido para os frutos que se desenvolvem mais tardiamente viria das folhas e também das hastes. No estágio em que aparece o primeiro capulho, a maior parte do N das sementes havia sido redistribuída das partes vegetativas da planta (Rosolem e Mikkelsen, 1989). A consequência disso é que uma planta bem nutrida em N não precisa de adubações tardias com o nutriente, uma vez que, na fase de maturação dos frutos, o principal fornecedor de N para o desenvolvimento das sementes é a parte vegetativa da planta. Uma aplicação de N nesta fase faria com que fosse estimulado novo crescimento, em concorrência com a frutificação, produzindo maçãs que se desenvolveriam em época menos favorável e, portanto, com fibras de pior qualidade.

O excesso de adubação nitrogenada, assim como o atraso na aplicação do fertilizante, faz com que o tamanho dos frutos aumente na parte superior da planta, com um aparente aumento na produtividade. No entanto, ao mesmo tempo que os frutos da parte superior da planta aumentam, o excesso do nutriente faz com que o tamanho dos da parte de baixo e da parte mediana da planta diminua (Boquet et al., 1994). Desta forma, o excesso de N modifica o perfil de produção da planta, priorizando estruturas frutíferas que normalmente apresentam menor qualidade de fibra. Assim, a produtividade do algodoeiro é menor.

Isso foi observado em Mato Grosso (*figura 2*), em área com baixo potencial de resposta a N, pois havia abrigado o cultivo de soja por vários anos. Embora as produtividades tenham sido altas, não houve resposta significativa em termos de produtividade de algodão. Por outro lado, o rendimento de beneficiamento caiu à medida que foram aumentadas as doses de N. Isso ocorre porque as sementes são ricas em proteína, e, assim, o maior fornecimento de nitrogênio proporciona maior crescimento das sementes, diminuindo o rendimento de benefício. Além da diminuição na porcentagem de fibra, o excesso de N pode reduzir o micronaire, comprimento, uniformidade, resistência, alongamento e fiabilidade (Ferreira et al., 2004), mostrando que a cultura, em condição de excesso de nitrogênio, prioriza o crescimento vegetativo. Isso havia sido demonstrado por Rosolem e Mikkelsen (1989), que determinaram serem as folhas o destino preferencial do nitrogênio absorvido no final do ciclo do algodoeiro. Assim, a planta supernutrida em nitrogênio chega ao final do ciclo mais verde, com retenção foliar muito alta, até mais bonita, mas está provavelmente escondendo um prejuízo.

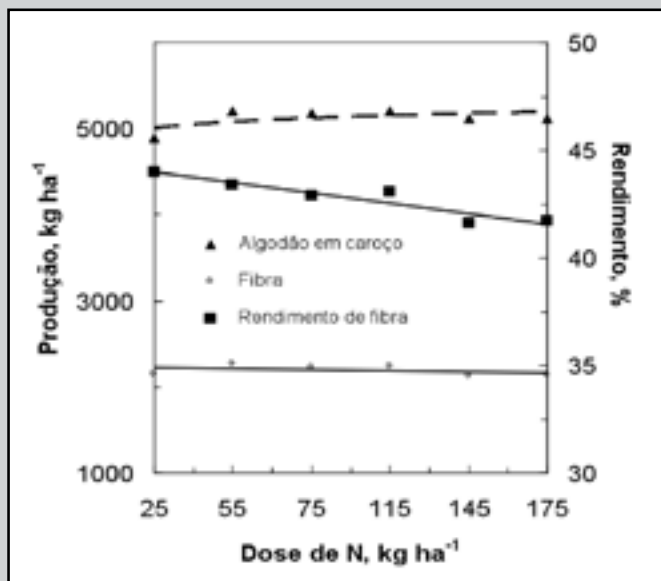


Figura 2. Resposta do algodoeiro a doses de nitrogênio quanto à produtividade de algodão em caroço, rendimento de fibra e fibra produzida. Local com baixo potencial de resposta.

Outro efeito conhecido do excesso de fertilizante nitrogenado, uma consequência do estímulo vegetativo, é que a planta fica mais alta, mas acaba produzindo menos, seja por uma queda na fotossíntese devida ao auto-sombreamento, ou por maior apodrecimento de maçãs ao final do ciclo. Isso foi demonstrado por Bogiani et al. (2011), cujos resultados se encontram na *figura 3*. Embora os resultados refiram-se a algodão adensado, esse tipo de resposta ocorre também em algodão cultivado em espaçamento convencional.

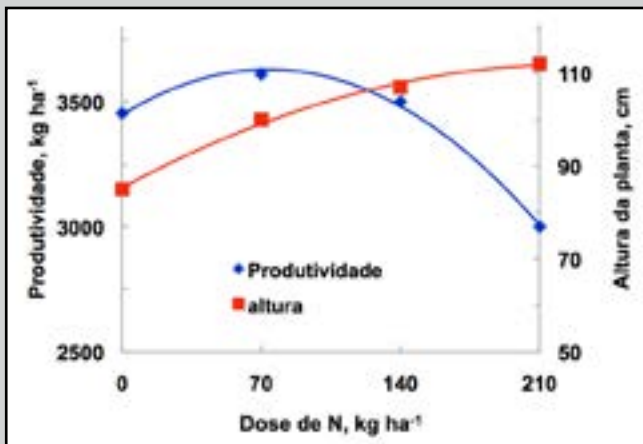


Figura 3. Resposta do algodão adensado ao nitrogênio, na Bahia. (Adaptado de Bogiani et al., 2011).

O excesso de adubação nitrogenada, causando maior área e retenção foliar, pode levar ao aumento de perdas por apodrecimento de maçãs ao final do ciclo do algodoeiro. Isso ficou demonstrado em experimento realizado com algodão adensado e em espaçamento normal, no Estado da Bahia (figura 4). Tanto no espaçamento de 0,76 m, recomendado para a região, como no espaçamento de 0,50 m, as perdas por apodrecimento foram altas. É interessante notar que, no espaçamento maior, as perdas foram ainda maiores que no espaçamento menor.

2. Fósforo

Rosolem et al. (1999) demonstraram que, quando o solo está muito deficiente em P, o algodoeiro produz raízes mais finas e longas, melhorando o acesso ao nutriente. Entretanto, isso funciona apenas quando o solo é muito pobre e, nessa situação, a produtividade seria baixa. Em condições de lavouras produtivas, com adubação fosfatada, esse mecanismo não funciona. Os autores demonstraram que o transporte do P no solo limita a absorção do nutriente pelo algodoeiro.

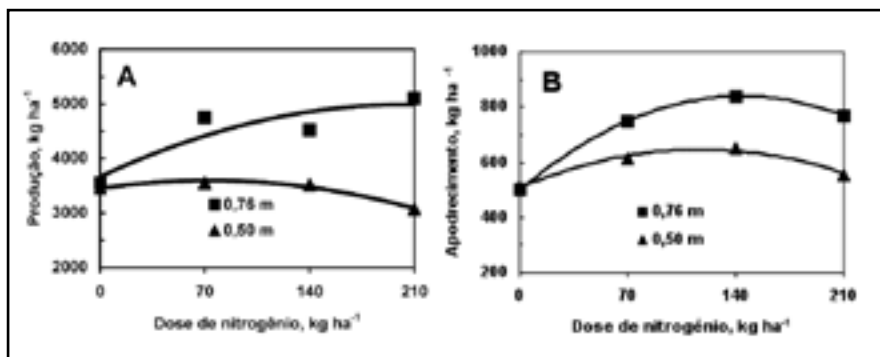


Figura 4. Resposta do algodoeiro ao nitrogênio, em espaçamentos de 0,76 m e 0,50 m entre linhas, no Estado da Bahia. A...Produção de algodão; B...Perdas por apodrecimento. Adaptado de Silva Filho et al. (2007).

Por outro lado, o fósforo é transportado no solo principalmente por difusão. Mais de 95% do P absorvido pelo algodoeiro chega às raízes por difusão. O problema é que, para que haja difusão razoável de P no solo, ele precisa ser muito rico no nutriente, de modo que seu poder de fixação esteja satisfeito, ou o solo precisa estar úmido, como demonstrado por Costa et al. (2006), cujos resultados encontram-se na figura 5.



Figura 5. Difusão de P no solo em função da umidade do solo (porosidade ocupada com água) e da adubação fosfatada (0%, 50% e 100% da capacidade de fixação). Adaptado de Costa et al. (2006).

Como pode ser visto na *figura 5*, quando não foi adicionado P, a difusão foi sempre muito baixa. Entretanto, com adubação fosfatada, o aumento da difusão pode até ser maior com o aumento da umidade do que propriamente com o aumento da dose de fertilizante.

Assim, é fundamental que haja disponibilidade de P em quantidade suficiente, perto das raízes, para que a planta possa desenvolver-se e produzir bem. Desta forma, considerando a baixa mobilidade do nutriente no solo e ainda sua grande adsorção pelas partículas do solo, tem sido recomendada a aplicação no sulco de semeadura, abaixo e ao lado das sementes, de modo que, a menos que se trate de solo corrigido, a aplicação localizada dará melhores resultados. Quando a dose a ser aplicada for maior que 100-120 kg ha⁻¹, talvez seja melhor associar a aplicação a lanço à aplicação em linha. Entretanto, nessa situação, talvez fosse melhor não cultivar o algodão até que o solo fosse adequadamente corrigido. É possível, em solos com teores entre adequados e altos de P, pelo menos por um ano, realizar adubação fosfatada a lanço, como demonstrado por Ferreira et al. (2004), na Bahia; entretanto, não há segurança para que essa prática seja repetida por mais tempo. Por outro lado, a localização do adubo próximo à semente promove melhor crescimento radicular inicial, desde que o fertilizante não seja colocado diretamente abaixo das sementes (Souza et al., 2007).

3. Potássio

O potássio é requerido pelo algodoeiro para manter o turgor da célula da fibra e assim facilitar o crescimento (alongação da fibra). Se o fornecimento de K for limitado durante o crescimento da fibra, haverá uma redução na pressão de turgor, resultando em menor comprimento. Uma vez que o K está associado ao transporte de açúcares, é possível que uma deficiência afete a deposição de microfibrilas de celulose na parede secundária das fi-

bras, afetando a resistência, finura e micronaire. Entretanto, poucos estudos de campo demonstraram que este papel crítico do K na qualidade da fibra realmente ocorra em lavouras. Na verdade, encontra-se na literatura revisada pequeno (Pettigrew, 1999) ou nenhum efeito (Read et al., 2006) do K nas propriedades da fibra. Assim, é provável que a deficiência de K precise ser severa para que se manifeste na qualidade da fibra, de modo que, em deficiência, a planta reduz a produção de frutos para assegurar K suficiente para as maçãs sobreviventes (Rochester et al., 2012).

O potássio, para ser absorvido pelas raízes, precisa ser transportado no solo. O principal mecanismo pelo qual ele entra em contato com as raízes do algodoeiro é a difusão, que contribui com 72 a 96 % do K absorvido (Oliveira et al., 2004). A adubação potássica, aumentando o teor de K na solução do solo, resulta em aumento da contribuição da difusão para o transporte desse nutriente às raízes da planta. Por outro lado, a difusão depende fundamentalmente da água disponível no solo. Assim, à medida que o solo seca, fica prejudicado o transporte de K às raízes.

Em algumas situações, tem ocorrido deficiência tardia de potássio, como durante o período de maior enchimento das maçãs, por exemplo. Essa síndrome tem sido atribuída ao fato de as variedades modernas serem mais precoces, mais produtivas e terem florescimento mais concentrado, além de mostrarem menor capacidade de “estocar potássio” durante o crescimento vegetativo (Oosterhuis, 1997). Além disso, há um significativo declínio na absorção de potássio pelo algodoeiro a partir de 80-90 dias após a emergência. Assim, a aplicação de potássio, principalmente na forma de nitrato de potássio, poderia aumentar o teor do elemento nas folhas, melhorando a translocação para os frutos e aumentando a produtividade e a qualidade da fibra.

Entretanto, para as condições brasileiras, não se observa resposta significativa à aplicação de KNO_3 via foliar ao algodoeiro (Rosolem e Whitacker, 2007). Tampouco foi observado aumento do teor de K nos frutos com a aplicação de nitrato de potássio (*figura 5*). A falta de resposta explica-se porque, embora o K seja móvel na planta, sendo translocado para os frutos, fica acumulado nas paredes das maçãs e não é translocado em grande quantidade para as sementes ou para as fibras, de modo que o algodoeiro, se bem nutrido em K durante o ciclo, pode suportar uma deficiência de K ao final do ciclo, sem perda de produtividade ou qualidade (Rosolem e Mikkelsen, 1991).

Tem-se observado que lavouras de algodão com fome de potássio sofrem aumento na severidade de doenças como a ramulária e ramulose. O índice de severidade da doença correlaciona-se inversamente com os teores de K nas folhas, sendo mínimo quando o algodoeiro tem 20 g kg^{-1} de K nas folhas. Por outro lado, a correlação é positiva com a relação N/K das folhas, demonstrando que, além da deficiência de K, um excesso de adubação com N poderá levar a maior incidência destas doenças (Carvalho et al., 2007).

4. Enxofre

No caso do enxofre, as quantidades absorvidas são bem menores que as de nitrogênio. Segundo Furlani Jr. et al. (2001), o algodoeiro absorve cerca de 30 kg ha^{-1} de enxofre, mas foi demonstrado recentemente que cultivares modernas podem acumular bem mais S, ou seja, quantidades superiores a 65 kg ha^{-1} (Ferrari et al., 2005). Tessaro et al. (2007) também determinaram que a quantidade de enxofre exportado por uma produção de $300 @$ ou 4.500 kg ha^{-1} de algodão em caroço, média de quatro situações, fica em torno de 6 kg ha^{-1} .

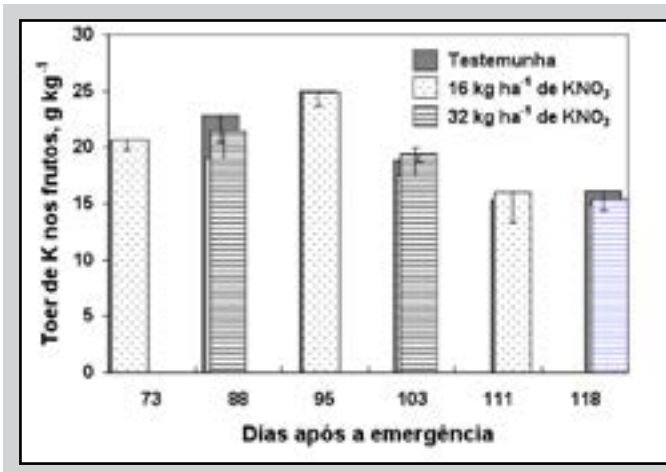


Figura 5.

Teor de K nos frutos do algodoeiro uma semana após o término dos tratamentos com 16 e 32 kg ha^{-1} de KNO_3 via foliar. Faz. Montanha, Pedemeiras-SP (Adaptado de Rosolem e Whitacker, 2007).

Para o enxofre, a marcha de absorção mostra que, até o aparecimento das primeiras flores, a taxa de absorção é baixa. A partir deste ponto, a taxa acelera-se, sendo o máximo acúmulo observado após o pleno florescimento. A máxima taxa de absorção de S ocorre durante o florescimento da cultura.

Por outro lado, o enxofre é pouco móvel no floema das plantas. Assim, é necessário que seja absorvido até praticamente o ponto em que o algodoeiro entra em “cut-out”.

5. Cálcio

O cálcio (Ca) participa da estrutura da planta dando estabilidade à membrana plasmática e parede celular, e sua carência afeta as zonas de crescimento. Sua presença na solução do solo é essencial para o crescimento e desenvolvimento radicular.

Este macronutriente é absorvido pelas raízes das plantas por fluxo de massa junto com a água do solo e desloca-se principalmente para os órgãos

da planta que transpiram. Por isso, é acumulado principalmente nas folhas. O transporte para os frutos via floema é limitado por ser pouco móvel dentro da planta. Esse fator impede sua redistribuição das folhas mais velhas para as mais novas, ou das folhas para os frutos ou sementes.

De acordo com Staut (1996), para cada tonelada de algodão em caroço produzida, a planta de algodão exporta via semente+fibra 2 kg dos 17,6 kg acumulados na planta; entretanto, Ferreira e Carvalho (2005) mostraram que, em lavouras de alta produtividade na Bahia (4.500 kg ha⁻¹ de algodão em caroço), foram exportados 2,9 kg dos 25,7 kg acumulados na planta para cada tonelada de algodão em caroço produzida.

Embora o algodoeiro tenha uma demanda relativamente alta por cálcio, as deficiências do elemento não são muito comuns no campo, uma vez que as áreas com lavouras de algodão são sempre muito bem corrigidas. Assim, a demanda de Ca é suprida pela calagem.

6. Magnésio

Conforme Ferreira e Carvalho (2005), lavouras de algodoeiro de alta produtividade na Bahia (4.500 kg ha⁻¹ de algodão em caroço) exportaram 4 kg dos 7,6 kg acumulados na planta para cada tonelada de algodão em caroço produzida. Nota-se que a quantidade acumulada é menor que a de Ca, entretanto, a quantidade exportada é maior.

O magnésio faz parte da molécula de clorofila, por isso é essencial sua presença para que a planta faça fotossíntese. O macronutriente é transportado às raízes das plantas principalmente por fluxo de massa. Assim, em épocas de veranico, a deficiência de Mg pode agravar-se.

Por ter alta mobilidade na planta, sendo facilmente retranslocado entre as partes, os sintomas de deficiência começam nas folhas do baixeiro da planta. Conforme Wiend (2007), em condições de carência de Mg, há dificuldade na translocação de carboidratos para a raiz, prejudicando o crescimento radicular, cuja deficiência, por sua vez, reduzirá a absorção de outros nutrientes. Ainda de acordo com o mesmo autor, a deficiência de Mg começa no nível molecular, e as folhas expostas ao sol localizadas perto dos frutos caem prematuramente. Wiend salienta ainda que existe uma faixa de deficiência marginal, latente, ou “fome oculta”, em que os sintomas não são visíveis, mas que têm forte impacto negativo sobre a produção. Por isso, o conteúdo de Mg tem de ser continuamente monitorado.

No algodoeiro, observou-se deficiência em condições de solos ácidos, que não foram corrigidos com calcário contendo Mg; solos de textura arenosa e intensa lixiviação; e solos corrigidos continuamente com calcário calcítico, sobretudo quando se aplicam altas doses de potássio. A competição entre Ca, Mg e K pelo mesmo sítio de troca, no processo de absorção, pode resultar no menor acúmulo de um desses elementos, tendo como consequência menor produtividade. Em teores equilibrados no solo e na solução do solo, os canais de magnésio, potássio e cálcio podem abrir-se, e os íons entram passivamente

te na célula. O problema é que eles não são muito seletivos e, assim, podem entrar Ca e Mg nos canais de K e vice-versa. Por isso, é importante que estes três nutrientes estejam em quantidades equilibradas no solo, pois mesmo em níveis adequados, o excesso de um deles poderá prejudicar a absorção dos outros e, com isso, afetar o desempenho produtivo do algodoeiro.

7. Micronutrientes

7.1. Boro

O boro está presente na solução do solo de várias formas. No entanto, em valores normais de pH, o mais abundante é o ácido bórico não dissociado. Na solução do solo, ele movimenta-se até as raízes das plantas, principalmente por meio do fluxo de massa (Barber, 1966). Por isso, sua absorção e transporte para os novos tecidos dependem do fluxo de transpiração. No campo, se a planta não estiver transpirando, seja por baixa disponibilidade de água no solo, fechamento dos estômatos em dias quentes e secos, temperaturas baixas, etc., a absorção de B será prejudicada, levando a uma deficiência temporária, mesmo que haja quantidades suficientes de B no solo.

O algodoeiro tem uma exigência relativamente alta de B (Zhao e Oosterhuis, 2002), em média 340 g ha⁻¹, sendo exportado através da semente e fibra aproximadamente 12% do acumulado na planta (Rochester, 2007). Por isso, é o micronutriente essencial cuja deficiência é mais comum no algodoeiro. Distúrbios nutricionais causados pela deficiência de B em algodão são bastante comuns em solos de Cerrado, nos quais a matéria orgânica do solo e/ou teor de argila são baixos (Rosolem et al., 2001).

Sabe-se que a deficiência de B pode limitar a produtividade de algodão sem qualquer sintoma visível na planta, caracterizando a ocorrência de “fome oculta” (Satya et al., 2009). A deficiência de B não é facilmente reconhecida, mesmo em diagnose foliar, uma vez que plantas de algodão contendo 11 mg kg⁻¹ de B nas folhas mais recentemente maduras produziram a mesma quantidade de matéria seca que as plantas não deficientes, mas o número de estruturas reprodutivas foi menor (Rosolem et al., 1999). Esta observação, também vista em condição de campo, mostra que o crescimento reprodutivo é mais sensível à deficiência de B que o vegetativo. O fenômeno tem várias origens possíveis, como: cada flor desenvolve-se dentro de um período de tempo pequeno; algumas estruturas reprodutivas (por exemplo, grãos de pólen, saco embrionário) têm menos acesso ao sistema vascular que qualquer órgão vegetativo (Van Iersel et al. 1994); a reprodução sexual envolve tipos de células especializadas, muitas das quais possuem paredes celulares distintas (Huang et al., 2009).

Com menor número de estruturas reprodutivas na planta, a demanda por fotoassimilados pelos drenos (maçãs) diminui, e o excesso de carboidratos fica disponível para o crescimento vegetal, resultando em maior crescimento, autossombreamento, maturidade tardia e menor rendimento.

Os níveis ideais de B em folhas de algodoeiro variam de 16 a 80 mg kg⁻¹ (Rosolem et al., 2001; Zhao e Oosterhuis, 2002), e os níveis tóxicos foram

observados a partir da faixa de 100 mg kg^{-1} (Bergmann, 1992). Devido a essa estreita faixa, a análise de folhas de plantas não é uma ferramenta altamente eficaz para monitorar o estado nutricional de B no algodoeiro ou estimar a resposta da planta com uso de fertilizantes boratados.

Apesar das respostas positivas de rendimento ao B aplicado tanto no solo ou diretamente em folhas, há controvérsia sobre quando aplicar B, assim como qual seria o melhor meio de fazê-lo. Segundo Xie et al. (1992), a absorção de B do solo por raízes é mais rápida que a absorção e translocação de B aplicado via foliar em algodoeiro. A baixa mobilidade de B no floema do algodoeiro representa uma complicação adicional, pois uma deficiência temporária pode levar à perda de rendimento. Nesses casos, embora a adubação foliar não tenha sido considerada tão eficaz para corrigir a deficiência de B em solos de baixa disponibilidade, ela pode ajudar a superar uma deficiência temporária de B, com melhora no rendimento de algodão em solos de Cerrado (Rosolem et al., 2001). Mais de 90% de B está ligado a parede celular e membranas, enquanto os restantes 10% estão disponíveis para remobilização. Além disso, o B aplicado nas folhas maduras não se liga às paredes celulares previamente formadas e também pode estar disponível para a mobilização. Bogiani e Rosolem (2012) observaram que a remobilização de B em algodão foi baixa, mas houve diferenças entre cultivares quanto à mobilidade de B a partir de raízes, caules e folhas de estruturas reprodutivas.

A toxicidade do B não é comumente encontrada nas áreas com lavouras de algodão do Brasil. Nos solos de Cerrado, há grande lixiviação de B, que é aumentada quanto maior a quantidade de água infiltrada no solo (Rosolem e Biscaro, 2007). Isso ajuda explicar o fato de que, apesar da utilização de doses relativamente altas de B no Centro-Oeste do Brasil, não é comum a constatação de sintomas de toxicidade, pois quando se adiciona B ao solo, grande parte do elemento pode ser perdida por lixiviação, devido ao alto regime de chuva nessas regiões, em que predominam solos de baixo teor de argila. Desta forma, se, por um lado, a lixiviação de B leva à perda econômica, por outro, pode ser um fator de segurança quando se aplicam doses excessivas do nutriente. No entanto, nos solos argilosos, por reterem B adicionado por período mais longo, doses relativamente altas podem ter efeito acumulativo, atingindo níveis tóxicos para o cultivo do algodoeiro.

7.2. Cobre

No Brasil, não se tem notícia de reposta do algodoeiro ao cobre. Em experimento conduzido em Campo Novo do Parecis-MT, em solo com $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de Cu, não foi observada resposta do algodoeiro ao cobre aplicado. Nesse caso, as folhas tinham mais de $6,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de boro. Entretanto, quando foi aplicado cobre ao algodoeiro em solo com $3,7 \text{ mg dm}^{-3}$ de B, houve diminuição da produtividade (Zancanaro, 2005).

7.3. Ferro

No Brasil, não se espera a ocorrência de deficiência de Fe na cultura do algodão. Entretanto, uma eventual deficiência poderá ser corrigida por meio de pulverização foliar com sulfato de ferro a 3% (Hinkle e Brown, 1968).

7.4. Molibdênio

A exigência do algodoeiro em Mo é baixa. Folhas deficientes mostram menos de $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mo, enquanto que folhas com mais de $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$ tinham aspecto saudável (Kallinis e Vretta-Kouskoleka, 1967). Como a disponibilidade de Mo aumenta com a elevação do pH, e o algodoeiro é uma planta sensível à acidez do solo, não se espera a ocorrência de deficiência de Mo em lavouras que receberam calagem. Entretanto, tem sido recomendada, por algumas empresas, a aplicação de Mo, via foliar, ao algodoeiro. Essa prática não encontra suporte em trabalhos de pesquisa, de modo que não deve ser utilizada.

7.5. Manganês

Em áreas onde o Mn aparece no solo em níveis tóxicos, como é o caso de boa parte dos estados de São Paulo e de Mato Grosso do Sul, assim como no Paraná, é fundamental a correção da camada arável até 60% de saturação por bases, para evitar a toxidez. Entretanto, em áreas com solos em que a deficiência de Mn é um problema, não seria necessária a correção até 60%, mesmo na camada arável.

Embora no Brasil sejam esperados mais problemas com a toxidez do que com a deficiência de Mn, em certos casos, doses altas de calcário, ou má incorporação do corretivo em solos com CTC baixa, podem concorrer para o aparecimento de deficiência do nutriente. Entretanto, trabalhos que vêm sendo realizados há alguns anos mostram que a resposta do algodoeiro ao Mn é muito pouco provável em solos com saturação por bases de até 60%. De acordo com Ferreira e Carvalho (2005), no oeste da Bahia, em solos de textura arenosa e média, nos quais a calagem em excesso chega a elevar o pH em água a valores acima de 6,3, é comum o aparecimento de deficiência de Mn, podendo haver aumento da produtividade com a aplicação foliar do nutriente.

Considerando que é possível a ocorrência de toxidez de Mn, dependendo da variedade empregada e da região do país, e tendo ainda em vista que, no Cerrado, o algodão somente vem sendo cultivado em solos previamente corrigidos, a aplicação de Mn deve ser muito criteriosa. Por exemplo, seria interessante esperar a manifestação inicial do sintoma nas folhas e então proceder à correção via aplicação foliar, que tem se mostrado bem eficiente para outras espécies, tal como a soja.

7.6. Níquel

O níquel é essencial para o bom funcionamento da urease na planta, que é responsável pela hidrólise da ureia a dióxido de carbono e amônia. Assim, a deficiência de Ni, ao impedir a ação da urease, aumenta o acúmulo de ureia nos tecidos foliares, causando necroses e prejuízo à produtividade. No caso do algodoeiro, não se tem notícia de resposta ao níquel. Também não foi encontrada interação da resposta ao níquel com a aplicação de doses de nitrogênio (Rigon et al., 2011), de modo que não se justifica a aplicação deste micronutriente ao algodoeiro.

7.7. Zinco

São escassos os dados relativos a efeitos da adubação com zinco na cultura algodoeira. Em solo ácido, corrigido por calagem e adubação mine-

ral, a omissão do micronutriente chegou a deprimir em 28% a produção (McLung et al., 1961). A respeito da pouca experimentação, admite-se que quantidades entre 10 e 20 kg ha⁻¹ de Zn, aplicadas ao solo, podem satisfazer a necessidade das plantas. Caso isso não seja feito, três a quatro pulverizações foliares, aplicando 1,0 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco, devem ser efetuadas (Hinkle e Brown, 1968).

8. Outros elementos

8.1. Alumínio

O algodoeiro é bastante sensível ao Al tóxico. O Al, quando em níveis tóxicos no solo, ou seja, quando o solo apresenta saturação por bases menores que 45%, aproximadamente, pode haver prejuízo no crescimento radicular, o que acaba afetando todo o processo de aquisição de nutrientes e água. Rosolem et al. (1997) estudaram o problema.

Na figura 6, encontram-se os comprimentos de raízes das cultivares IAC 20, IAC 22 e ITA 90, em função da saturação do solo por bases. Nota-se que quando a saturação do solo por bases era da ordem de 50%, todas as cultivares produziram o máximo comprimento radicular, o que demonstra que esse sistema radicular é muito sensível ao Al tóxico, já que a saturação em que o crescimento foi máximo corresponde aproximadamente à saturação em que não mais se observa Al em concentrações tóxicas. Não foram observadas diferenças entre as cultivares.

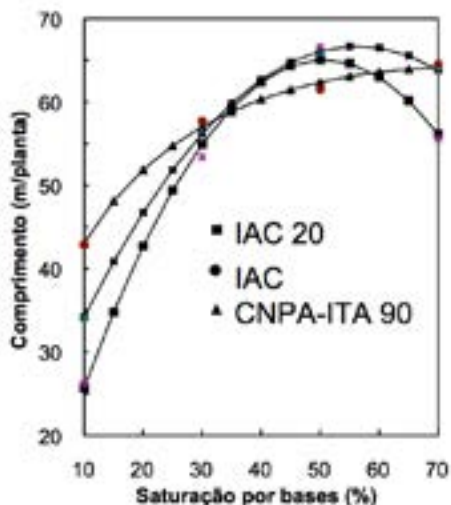


Figura 6.

Comprimento radicular de variedades de algodão em função da cultivar e da saturação do solo por bases.

Em estudos de campo conduzidos no Estado de São Paulo, observou-se que somente se consegue altas produções de algodão quando o solo mostra, na camada arável, pelo menos uma saturação por base da ordem de 60% (Silva et al., 1995). Mas essa não é condição suficiente para altas produções, porque a obtenção das maiores produções depende não apenas de uma saturação por bases de 60% na camada arável, mas é também necessária uma saturação mínima de 45 a 50% nas camadas subsuperficiais. É interessante notar como esses resultados obtidos em cinco anos de campo são completamente compatíveis com os resultados de casa de vegetação (figura 6), mostrando a necessidade de correção do Al tóxico pelo menos até 60 cm de profundidade no solo.

8.2. Silício

Há na literatura indicações de que o silício pode aumentar o crescimento e a produtividade, a resistência a pragas e doenças, a força mecânica do colmo e a resistência ao acamamento de diversas plantas. Além disso, pode favorecer a penetração da luz no dossel da planta por manter as folhas mais eretas em cereais, promovendo assim a fotossíntese. Pode ainda incrementar a atividade radicular, promovendo a absorção de água e nutrientes, principalmente o nitrogênio, o fósforo e o potássio; neutraliza o alumínio tóxico do solo, bem como diminui a toxidez causada pelo manganês e outros metais pesados. Isso tudo pode ocorrer, mas, certamente, depende da espécie em questão. Normalmente, os maiores benefícios do silício têm sido observados em gramíneas. Mesmo assim, tem-se aventado o uso de Si em lavouras algodoceiras.

Em algodoeiro, embora se tenha encontrado um efeito positivo do silício na fotossíntese (Ferreira, 2008), a aplicação do elemento em altos níveis resultou em tendência de diminuição do número de maçãs (Nóbrega et al., 2007). Em outro trabalho, concluiu-se que, de uma forma geral, as doses de silício aplicadas no solo para a cultura do algodão não devem ser elevadas, pois podem trazer perdas de germinação e crescimento em altura de forma excessiva (Cunha et al., 2005). Com relação à qualidade da fibra, não se observou efeito positivo quanto à resistência e alongamento à ruptura (Madeiros et al., 2005). Há ainda evidências de que, em algodoeiro, o silicato de potássio não foi eficiente para o controle da ramulária com severidade de 15,38% (Aquino et al., 2008) e não afetou a preferência do pulgão (Alcântara et al., 2010).

Logo, não há evidências que sugiram que o silício possa, de fato, resultar em efeitos positivos na produtividade, qualidade e sanidade da cultura do algodão.

Referências bibliográficas

ALCÂNTRA, E.; MORAES, J. C.; ANTONIO, A. Efeito de indutores da resistência e cultivares de algodão no comportamento de *Aphis gossypii*. **Revista Ciência Agrônoma**, 41: 619-624, 2010.

AQUINO, L. A.; BERGER, P. G.; RODRIGUES, F. Á.; ZAMBOLIM, L.; OGOSHI, F.; MIRANDA, L. M.; LÉLIS, M. M. Controle alternativo da mancha de Ramulária

do algodoeiro. **Summa Phytopathol.**, 34: 131-136, 2008.

BARBER, S. A. The role of root interception, mass-flow and diffusion in regulating the uptake of ions from soils. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Limiting steps in ion uptake by plants from soil**. Vienna, 1966, p.39-45. (IAEA. Technical Report Series, 65).

BERGMANN, W. **Colour Atlas: Nutritional disorders of Plants**. p. 204-239. Gustav Fisher, N.Y. 1992.

BOGIANI, J. C.; FERREIRA, G. B.; SMIDERLE, O. J.; MOURÃO JR., M.; BORIN, A. L. D. C. Adubação com potássio e nitrogênio de cultivares de algodoeiro sob sistema de cultivo adensado. In: Congresso Brasileiro do Algodão, 8, 2011. São Paulo, SP. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2011. CD Rom.

BOGIANI, J. C.; ROSOLEM, C. A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p.1499-1506, 2012.

BOQUET, D. J.; MOSER, E. B.; BREITENBECK, G. A. Boll weight and within-plant yield distribution in field-grown cotton given different levels of nitrogen. **Agronomy Journal**, 86, 20-26. 1994.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA FILHO, G.; SANTOS, J. R. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10: 828-835, 2006.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E.C., ed. **Algodão no Cerrado Brasileiro**. Brasília: Abrapa, 2007. p. 581-647.

CUNHA, P. F. F. C.; MADEIROS, L. B.; ALVES, W. W. A., FERNANDES, P. D.; BELTRÃO, N. E. M.; LACERDA, M. D.; FEITOSA, J. V. Cultivo de algodão herbáceo com adubação de escória siderúrgica: avaliação de crescimento. In: Congresso Brasileiro de Algodão. **Anais...** 5, 2005. Salvador, CDRom.

FERRARI, J. V; FURLANI JR., E. FERRARI, S.; SANTOS, M. L.; PERSEGUIL, E. O.; SANTOS, D. M. A. Extração de enxofre pelos cultivares de algodão Delta-penta, Acala 90 e Coodetec 401. In: Congresso Brasileiro de Algodão, 5, 2005, Salvador. **Anais...**, Embrapa Algodão, 2005.

FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. C. S. **Adubação do algodoeiro no Cerrado: Com resultados de pesquisa em Goiás e Bahia**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. 71 p. (Documentos, 138).

FERREIRA, S. M. O efeito do silício no algodoeiro: aspectos bioquímicos, qua-

lidade de fibra e produtividade. Piracicaba, ESALQ/USP, Tese de doutorado, 68 p. 2008.

FERREIRA, G. B.; SEVERINO, L. S.; PEDROSA, M. B.; ALENCAR, A. R.; VASCONCELOS, O. L.; FERREIRA, A. F. ABREU JR., J. S. Resultados de pesquisa com a cultura do algodão no Oeste e Sudoeste da Bahia, Safra 2003/2004. Campina Grande, Embrapa Algodão. Documentos, 133. 2004. 112p.

FURLANI JR., E.; SILVA, N. M.; BUZETTI, S.; SÁ, M. E.; ROSELEM, C. A.; CARVALHO, M. A. C. Extração de macronutrientes e acúmulo de massa seca de algodão cv. IAC 22. **Cult. Agron.**, 10:71-87, 2001.

HINKLE, D. A.; BROWN, A. L. Secondary nutrients and micronutrients. In: **Advances in production and utilization of quality cotton: principles and practices**. Ames: The Iowa State University Press, 1968, 532p.

HUANG, L.; BELL, R. W.; DELL, B. Exploring the Physiological Basis for High Reproduction Sensitivity to Boron Deficiency in Plants. **Proc. International Plant Nutrition Colloquium XVI**, DavisCalif. 2009.

KALLINIS, T. L.; VRETTA-KOUSLOLEKA, H. **Molybdenum Deficiency Symptoms in Cotton**, SSSAJ, 31: 507-509. 1967.

MADEIROS, L. B.; ALVES, W. W. A.; FONSECA, R. G.; FEITOSA, J. V. Algodão branco e colorido submetido à adubação silicatada: qualidade da fibra. In: Congresso Brasileiro de Algodão. **Anais...** 5, 2005. Salvador, CDRom.

MCLUNG, A. .; FREITAS, L. M. M.; MIKKELSEN, D. S.; LOTT, N. L. A adubação do algodoeiro em solos de campo cerrado no Estado de São Paulo. São Paulo, IBEC Research Institute, 1961. 35p. (Boletim, 27).

MULLINS, G. L.; BURMESTER, C. H. Relation of growth and development to mineral nutrition. Pp. 97-105. In: STEWART, J. M.; OOSTERHUIS, D. M.; HEITHOLT, J. M.; MAUNEY, J. R. (Eds) **Physiology of Cotton**. Springer, New York. 2010.

NÓBREGA, J. A.; MADEIROS, L. B.; GOUVEIA NETO, G. C.; NOBRE, R. G.; DANTAS NETO, J.; OLIVEIRA, J. D. C. Produção do algodoeiro adubado com escória siderúrgica. **Revista Educação Agrícola Superior**, 22: 51-53, 2007.

OLIVEIRA, R. H.; ROSELEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28: 439-445. 2004.

OOSTERHUIS, D. M. Potassium nutrition of cotton in the U.S.A. with particular reference to foliar fertilization. In: EL-FOULY, M. M.; OOSTERHUIS, D.M.; KOSMIDOU-DIMITROPOULOU, K. Nutrition and Growth Regulators in Cotton.

Cairo: FAO. pp. 101-124. 1997.

PETTIGREW, W. T. Potassium deficiency increases specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton. **Agron. J.**, 91: 962-968. 1999.

READ, J. J.; REDDY, K. R.; JENKINS, J. N. Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. **Eur. J. Agron.** 24: 282-290. 2006.

RIGON, J. P. G.; BRITO NETO, J. F.; CAPUANI, S.; BELTRÃO, N. E. M.; SILVA, F. V. F. Utilização de nitrogênio e níquel durante o crescimento do Algodão. **Enciclopédia biosfera**, 7: 1019- 1026. 2011.

ROCHESTER, I. J. Nutrient uptake and export from an Australian cotton Field. **Nutrient cycling in Agroecosystems**, 77, 213-223. 2007.

ROCHESTER, I. J.; CONSTABLE, G. A.; OOSTERHUIS, D. M.; ERRINGTON, M. Nutritional requirements of cotton during flowering and fruiting. In: OOSTERHUIS, D.M.; COTHREN, J.T. **Flowering and fruiting in cotton**. Cordova, The Cotton Foundation. 2012. p.35-50.

ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1473-1478, 2007.

ROSOLEM, C. A.; ESTEVES, J. A. F.; FERELLI, L. Resposta de cultivares de algodoeiro ao boro em solução nutritiva. **Scientia Agricola**, v.56, p.705-711, 1999.

ROSOLEM, C. A.; GIOMMO, G. S.; LAURENTI, R. L. B. Crescimento radicular e nutrição de cultivares de algodão em resposta à calagem. IN: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 26, SBCS, Rio de Janeiro, 1997. **Resumos**, Rio de Janeiro, SBCS, p. 150, 1997. (publicado também em CD-Rom)

ROSOLEM, C. A.; MIKKELSEN, D. S. Nitrogen source-sink relationship in cotton. **Journal of Plant Nutrition**, 12, 1417-1433. 1989.

ROSOLEM, C. A.; MIKKELSEN, D. S. Potassium absorption and partitioning in cotton as affected by periods of potassium deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, 14: 1001-1016. 1991.

ROSOLEM, C. A.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Algodão, Amendoim e Soja. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, van. B.; ABREU, C. A. (Eds). **Micro-nutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001, p.321-354.

ROSOLEM, C. A.; WITACKER, J. P. T. **Adubação foliar com nitrato de potássio em algodoeiro**. Bragantia, 66: 147-155. 2007.

ROSOLEM, C. A.; WITACKER, J. P. T.; VANZOLINI, S.; RAMOS, V. J. The significance of root growth on cotton nutrition in an acid low-P soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, 212 (2): 185-190. 1999.

SATYA, S.; PITCHAI, J. G.; INDIRANI, R. **Boron nutrition of crops in relation to yield and quality** - A review. *Agric. Rev.*, v. 30, p.139-44, 2009.

SILVA, N. M.; CARVALHO, L. H.; QUAGGIO, J. A. **Ensaio de longa duração com calcário e cloreto de potássio na cultura do algodoeiro**. *Bragantia*, 54: 353-360. 1995.

SILVA FILHO, J. O.; PEDROSA, M. B.; SANTOS, J. B. Pesquisas com algodoeiro no Estado da Bahia, Safra 2005/2006. Campina Grande, Embrapa Algodão, 170p. 2007. (Documentos, 164)

SOUZA, F. S.; FARINELLI, R.; ROSOLEM, C. A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:387-392, 2007.

STAUT, L. A. Fertilização fosfatada e potássica nas características agronômicas e tecnológicas do algodoeiro na região de Dourados-MS. Jaboticabal, 1996. 124f. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Jaboticabal-SP.

TESSARO, L. C.; ZANCANARO, L. **Uso eficiente de fertilizantes**. É hora do Algodão. Fundação MT. CD Rom. 2007.

THOMPSON, A. C.; LANE, H. C.; JONES, J. W.; HESKETH, J. D. Nitrogen concentrations of cotton leaves, buds and bolls in relation to age and nitrogen fertilization. **Agron. J.**, 68:617-621. 1976.

VAN IERSEL, M. W.; OOSTERHUIS, D. M.; HARRIS, W. M. Apoplastic water flow to cotton leaves and fruits during development. **J. Exp. Bot.**, v.45, p.163-169, 1994.

WIEND, T. Magnésio nos solos e nas plantas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 117, 2007. p.19-21.

XIE, Q.; WEI, W. X.; WANG, Y. H. Studies on absorption, translocation and distribution of boron in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Acta agronomica sinica**. Beijing, v.18, p.31-7, 1992.

ZANCANARO, L. Manejo da adubação do algodoeiro no Estado do Mato Grosso. In: Congresso Brasileiro do Algodão, 5, 2005. Salvador, BA. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. CD Rom.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M. Cotton carbon exchange, nonstructural carbohydrates, and boron distribution in tissues during development of boron deficiency. **Field Crops Research**, v.78, p.75-87, 2002.

