

MELHORAMENTO GENÉTICO DE SORGO

Cicero Beserra de Menezes
Editor Técnico



Embrapa

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Melhoramento Genético de Sorgo

*Cícero Beserra de Menezes
Editor Técnico*

*Embrapa
Brasília, DF
2021*

Embrapa Milho e Sorgo

Rod.MG 424 Km45
Caixa Postal 151 CEP 35701-970
Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Unidade responsável pelo
conteúdo e edição**
Embrapa Milho e Sorgo

Comitê Local de Publicações
Presidente
Maria Marta Pastina

Secretária-Executiva
Elena Charlotte Landau

Membros
Antonio Claudio da Silva Barros
Cláudia Teixeira Guimarães
Mônica Matoso Campanha
Roberto dos Santos Trindade
Maria Cristina Dias Paes
Rosângela Lacerda de Castro

Revisão de texto
Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica
Rosângela Lacerda de Castro

Capa e editoração eletrônica
Ricardo Designer

Fotos da Capa
Cícero Beserra de Menezes

1ª edição
1ª impressão (2021): 400 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Milho e Sorgo

Melhoramento genético de sorgo / Cícero Beserra de Menezes, editor técnico. –
Brasília, DF : Embrapa, 2021.
PDF (546 p.): il. color 16 cm x 22 cm

ISBN: 978-65-87380-58-2

1. *Sorghum bicolor*. 2. Sorgo granífero. 3. Sorgo forrageiro. 4. Sorgo bioenergia
5. Melhoramento Vegetal.

CDD (21. ed.) 633.15

Autores

Alexandre Hugo César Barros

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Solos, UEP Recife, PE

Aluizio Low Simões

Engenheiro-agrônomo, mestre em Fitomelhoramento, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

Ana Rita de Moraes Bandão Brito

Engenheira-agrônoma, mestre em Fitomelhoramento, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

Bruno Henrique Sardinha de Souza

Biólogo, doutor em Agronomia, professor Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG

Camila da Silva Fernandes Souza

Engenheira-agrônoma, estudante de doutorado em entomologia, coordenadora de Pesquisa Grupo Terras Gerais, Lavras, MG

Carlos Juliano Brant Albuquerque

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, professor da Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, MG

Carmela Vaz Campolina

Graduanda em agronomia, Universidade Federal de São João del-Rey, Sete Lagoas, MG

Cicero Beserra de Menezes

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Claudia Teixeira Guimarães

Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Claudio Prates Zago

Engenheiro-agrônomo, mestre em Fitotecnia, pesquisador e ex-diretor superintendente da Helix Sementes e Mudas, Capinópolis, MG

Crislene Vieira dos Santos

Engenheira-agrônoma, estudante de doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Eric Xavier de Carvalho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Técnicas Energéticas e Nucleares aplicadas à bioenergia, pesquisador do Instituto Agrônomico de Pernambuco, Recife, PE

Evandro de Abreu Fernandes

Médico-veterinário, doutor em Bioquímica, aposentado da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG

Flávio Dessaune Tardin

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Frederico Augusto Ribeiro de Barros

Engenheiro de alimentos, Ph.D. em Food Science and Technology, professor da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Geraldo Afonso de Carvalho Junior

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Helix Sementes e Mudas, Sorriso, MT

Helena Maria Pinheiro-Sant'Ana

Nutricionista, doutora em Ciência dos Alimentos, professora da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Hércia Stampini Duarte Martino

Nutricionista, Ph.D. em Ciência e Tecnologia de Alimentos, professora da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Isadora Cristina Martins Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, bolsista de pós-doutorado na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Ivênio Rubens de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

José Alves Tavares

Engenheiro-agrônomo, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

José Avelino Santos Rodrigues

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador aposentado da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

José Geraldo Eugênio de França

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Fitomelhoramento e Agroenergia, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

José Jorge Tavares Filho

Engenheiro-agrônomo, Mestre em Fitomelhoramento, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

José Magid Waquil

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Entomologia, professor visitante da Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, MG

José Nildo Tabosa

Engenheiro-agrônomo, doutor em Técnicas Energéticas e Nucleares aplicadas ao Melhoramento Genético Vegetal, pesquisador do Instituto Agrônomico de Pernambuco, Recife, PE

Josimar Bento Simplício

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, PE

Jurandir Pereira Segundo

Engenheiro-agrônomo, mestre em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Helix Sementes e Mudas, Ipiáçu, MG

Jurandir Vieira Magalhães

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Kamila Rezende Dázio de Souza

Bióloga, doutora em Agronomia, pós-doutoranda da Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG

Karla Jorge da Silva

Engenheira-agrônoma, doutora em Genética e Melhoramento de Plantas, bolsista de pós-doutorado na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Leandro de Moraes Cardoso

Nutricionista, professor da Universidade Federal de Juiz de Fora, Governador Valadares, MG

Maria Lúcia Ferreira Simeone

Química, doutora em Química Orgânica, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Marta Maria Amâncio do Nascimento

Engenheira-agrônoma, doutora em Biotecnologia Vegetal, pesquisadora do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

Nádia Nardely Lacerda Durães Parrella

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, professora da Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, MG

Paulo César Magalhães

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Fisiologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Paulo Mota Ribas

Engenheiro-agrônomo, ex-diretor superintendente da Helix Sementes e Mudas, Belo Horizonte, MG.

Paulo Afonso Viana

Ph.D. em Entomologia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Pedro César de Oliveira Ribeiro

Engenheiro-agrônomo, estudante de doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Rafael Augusto da Costa Parrella

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Robert Eugene Schaffert

Agriculturist, Ph.D. em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Rogério Soares de Freitas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas, Votuporanga, SP

Ruane Alice da Silva

Engenheira-agrônoma, mestre em Genética e Melhoramento de Plantas, Coordenadora de Nursery Long Ping High Tech, Uberlândia, MG

Simone Martins Mendes

Engenheira-agrônoma, doutora em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Sylvia Morais de Sousa

Bióloga, doutora em Genética e Biologia Molecular, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Thiago Corrêa de Souza

Biólogo, doutor em Fisiologia Vegetal, professor da Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG

Valéria Aparecida Vieira Queiroz;

Nutricionista, doutora em Produção Vegetal, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Venézio Felipe dos Santos

Engenheiro-agrônomo, estatístico, pesquisador do Instituto Agronômico de Pernambuco, Recife, PE

APRESENTAÇÃO

O sorgo está entre as culturas mais plantadas no globo, em razão da sua versatilidade (grãos, forragem, biomassa, etanol, vassoura), e da sua alta digestibilidade para alimentação animal e humana.

No Brasil, o cultivo de sorgo granífero em sucessão à soja tem contribuído expressivamente para a oferta sustentável de grãos para a agroindústria de rações. O sorgo silageiro está presente nas principais bacias leiteiras do País, pela qualidade da forragem. Já os sorgos biomassa e bioenergia possuem futuro muito promissor pela necessidade atual de energia limpa e renovável.

Diante desse cenário, informações de pesquisa se fazem necessárias para alavancar a cadeia produtiva do sorgo. Conhecimentos técnicos sobre o cultivo e o manejo do sorgo são abundantes, e de fácil acesso a produtores, extensionistas e consultores. Mas quando se considera literatura na área de genética e melhoramento, essas informações são escassas.

Esta obra reúne a importância do sorgo, e disserta sobre vários tópicos do melhoramento, tais como melhoramento de sorgo granífero, forrageiro e bioenergia, melhoramento para estresse abiótico e biótico, desenvolvimento de cultivares e produção de sementes. Além disso, são mostrados esquemas de melhoramento desde a criação de populações até o desenvolvimento dos híbridos, havendo foco principalmente nos detalhes de desenvolvimento de linhagens e avanço de gerações.

O livro tem o objetivo também de incentivar o desenvolvimento de empresas de melhoramento de sorgo, e de promover o treinamento de novos melhoristas nas escolas de ensino superior e empresas de sementes.

Frederico Ozanan Machado Durães
Chefe-Geral da Embrapa Milho e Sorgo

Sumário

Capítulo 1

Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil 13

Capítulo 2

Origem, evolução e domesticação do sorgo..... 59

Capítulo 3

Biologia e fisiologia do sorgo 81

Capítulo 4

Uso da macho-esterilidade no melhoramento genético do Sorgo..... 115

Capítulo 5

Métodos de melhoramento de sorgo..... 145

Capítulo 6

Esquemas e metodologias de desenvolvimento na obtenção de linhagens e híbridos de sorgo. 167

Capítulo 7

Síntese e melhoramento de populações em sorgo..... 203

Capítulo 8

Melhoramento Genético de Sorgo Granífero..... 217

Capítulo 9

Melhoramento Genético de Sorgo Forrageiro..... 241

Capítulo 10

Cultivares de sorgo para produção de bioenergia..... 278

Capítulo 11	
Melhoramento genético do sorgo para o semiárido brasileiro.....	293
Capítulo 12	
Melhoramento de sorgo para tolerância à seca.....	341
Capítulo 13	
Recursos genético-moleculares para auxiliar o melhoramento do sorgo.....	382
Capítulo 14	
Resistência de sorgo a insetos-praga.....	396
Capítulo 15	
Tolerância ao alumínio e eficiência na absorção de fósforo em sorgo.....	438
Capítulo 16	
Sorgo para Alimentação Humana.....	459
Capítulo 17	
Tecnologia de produção de sementes de sorgo.....	495
Capítulo 18	
Regulamentação para produção de sementes de sorgo.....	527

Capítulo 1

Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil

Cicero Beserra de Menezes
Evandro de Abreu Fernandes
Rafael Augusto da Costa Parrella
Robert Eugene Schaffert
José Avelino Santos Rodrigues

Tipos de Sorgo

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] apresenta múltiplos usos, tais como a produção de grãos, forragem, vassoura, álcool e biomassa. Sua tolerância ao estresse hídrico, ciclo curto e alto rendimento têm sido as principais razões para o aumento da área plantada com este cereal no mundo. No Brasil são cultivados seis tipos de sorgo: o sorgo granífero, para produção de grãos; o sorgo forrageiro, para produção de silagem; o sorgo de corte e pastejo, para uso direto como forragem; o sorgo vassoura, para produção de vassoura artesanal; o sorgo sacarino, para produção de etanol; e o sorgo biomassa, que pode ser utilizado como fonte de energia térmica em usinas, ou para palhada no sistema de plantio direto (Figura 1).

Importância do Sorgo Granífero

A cultura do sorgo tem despontado como a principal opção para produção de grãos e forragem nas situações em que o déficit hídrico oferece maiores riscos para outras culturas, por exemplo, o milho. O avanço da agricultura no Cerrado, com seus diversos sistemas de produção, continua ampliando as possibilidades para os diferentes tipos de sorgo (Almeida et al., 2015; Menezes, 2020). O cultivo da soja, principal parceira no sistema de sucessão de culturas, avança para os estados do Norte e Nordeste, com o sorgo acompanhando tal avanço. O sistema de plantio direto ajusta-se especialmente à cultura do sorgo, por causa da excelente produção de palha.



Fotos: Cicero Menezes e Rafael Parrella

Figura 1. Tipos de sorgo mais plantados no Brasil

Em termos mercadológicos, o cultivo de sorgo granífero em sucessão às culturas de verão, principalmente a soja, na chamada segunda safra, tem contribuído para a oferta sustentável de grãos de baixo custo para a agroindústria de rações e permitido o cultivo deste grão em épocas mais tardias onde o volume de chuvas esperado não é suficiente para o cultivo do milho (Landau; Netto, 2015; Menezes et al., 2018). Atualmente, em toda a região produtora de grãos de sorgo do Brasil Central, o produto mostra boa liquidez para o agricultor e preços competitivos para a indústria, que, cada vez mais, procura alternativas para compor suas rações com qualidade e menor custo.

Outra vantagem do sorgo é sua menor suscetibilidade às micotoxinas, em relação ao milho, o que confere a ele grande aceitação para composição de rações para animais domésticos, aves e suínos, que são muito sensíveis à presença dessas substâncias (Antunes et al., 2008; Assuena et al., 2008; Weber et al., 2018).

O sorgo é o quinto cereal mais plantado no globo, após o trigo, o arroz, o milho e a cevada, sendo cultivado em regiões tropicais e semiáridas (FAO, 2019). Além de ser plantado em regiões com bom regime hídrico, o sorgo possui características adaptativas para cultivo em áreas de estresse hídrico, bem superiores às destes outros cereais, o que explica o seu cultivo em milhões de hectares, em países da África, Ásia, Oceania e das Américas.

No Brasil, a área cultivada de sorgo granífero na safra 2019/2020 foi de 835 mil hectares, e a produção de grãos foi de 2,5 milhões de toneladas (Figura 2). Esta área varia conforme condições climáticas ou plantio da soja no verão. Basicamente em todas as áreas onde a soja é plantada existe sorgo também.

A soja é plantada no verão, nos meses de outubro/novembro, com colheita em final de janeiro e início de fevereiro, e subsequentemente é plantado o milho. No entanto, quando o plantio da soja atrasa, e a colheita é realizada após segunda semana de fevereiro, o recomendado é plantar sorgo. Em anos mais secos a área de sorgo cresce por ele ser mais tolerante que o milho. A produtividade nacional aumentou levemente nos últimos anos e situa-se em torno de 2.900 kg ha⁻¹.

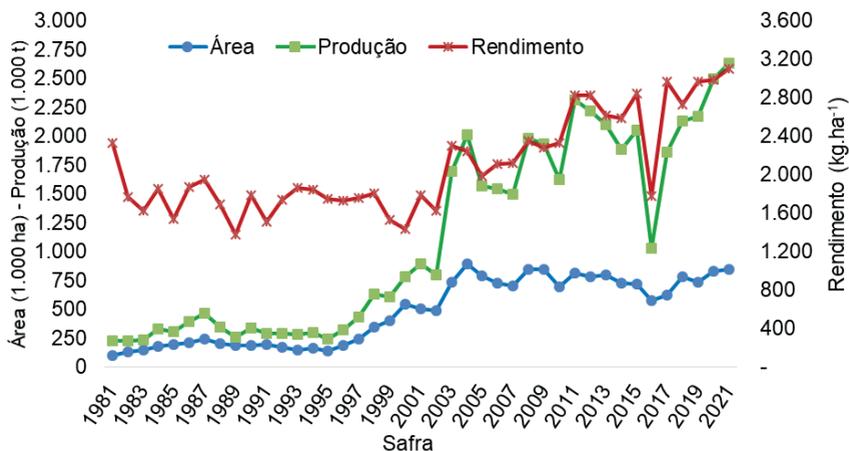


Figura 2. Série histórica de produção, área e produtividade de sorgo granífero, nos últimos 40 anos, no Brasil. 2021

Fonte: Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos (2019).

Apesar dos aumentos observados na produtividade, a média nacional está muito aquém do potencial desta cultura. Experimentos demonstram que a produtividade dos híbridos mais novos pode ultrapassar 7,0 t/ha, em condições favoráveis de safrinha (Resende et al., 2009; Menezes et al., 2015). Produtores tecnificados, que seguem orientações corretas de cultivo, levando em consideração época adequada de semeadura, adubação de solo, uso de fungicidas e de cultivares adaptadas, têm conseguido esse teto superior.

As regiões Centro-Oeste e Sudeste respondem por 88% da produção nacional de sorgo, mas as regiões Sul, Norte e Nordeste também têm mostrado investimentos em pesquisa e divulgação da cultura. Goiás é o principal estado produtor, com 45% da produção nacional, seguido por Minas Gerais (33%). Os estados de Mato Grosso e Bahia são importantes produtores de sorgo também. Nos últimos anos com o avanço da soja em novas fronteiras agrícolas, como Tocantins e Piauí (Matopiba), o sorgo tem avançado junto.

No Brasil Central, o sorgo é plantado em sucessão às culturas de verão, principalmente a soja, na segunda safra, nos meses de fevereiro e março. Na região Sul, o sorgo é plantado na primavera, outubro/novembro, e colhido no outono. E no Nordeste, a cultura é plantada em março/abril. Uma característica comum a todas estas regiões de cultivo é o plantio de sequeiro. Nestas áreas produtoras, mais de 95% utilizam híbridos simples. Somente algumas poucas áreas no Sul e Nordeste trabalham com variedades. Considerando essas informações, as empresas de sementes têm dedicado esforços no desenvolvimento de híbridos mais produtivos para a segunda safra. Esta época de semeadura é muito propícia a veranicos longos, principalmente no final do ciclo da cultura, sendo importante o plantio de cultivares mais precoces que tenham o enchimento de grãos antes do final das chuvas. Cultivares tardias são recomendadas somente para cultivo no início da safrinha.

Sorgo Grão na Alimentação Animal

As principais fontes de energia nas rações de animais são os grãos com maior concentração de amido, como o milho e o sorgo. No Brasil, para compor uma ração, o grão de milho é o principal componente, com participação média de 60% nas rações dos frangos de corte e de poedeiras e 65% nas rações de suínos, representando um fornecimento de cerca de 2.030 kcal de energia metabolizável nas rações avícolas e 2.170 kcal de energia metabolizável nas rações de suínos (Fernandes et al., 2014b).

Como alternativa ao milho, tem-se o grão de sorgo. O custo do grão de sorgo na alimentação animal é, em média, 25% inferior ao do milho, enquanto seu valor biológico, medido na forma de energia metabolizável, alcança pelo menos 95% do valor do milho. O sorgo representa, portanto, uma alternativa importante para o abastecimento do mercado de grãos, e, por suas características nutricionais, tem sido pesquisado como ingrediente energético alternativo ao milho (Fernandes et al., 2014a; McCuistion et al.,

2019).

O sorgo pode substituir o milho em 100% na composição de rações para animais, em especial aves (Fernandes et al., 2014a, 2014b). Comparando-se ao milho, o sorgo possui valor energético de 95% para aves e galinhas, e 100% para suínos e porcas (Figura 3) (Rostagno et al., 2017). A substituição do grão de milho pelo de sorgo nas rações pode representar considerável redução de preço final da carne e ovos, podendo aumentar o lucro do produtor.

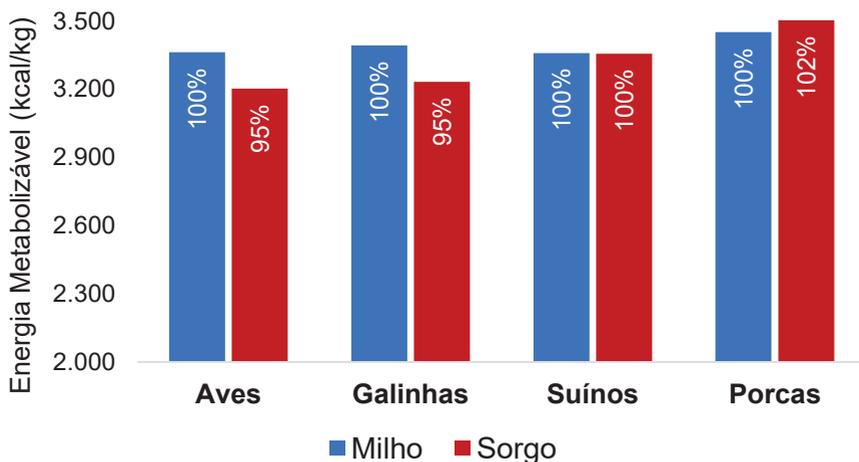


Figura 3. Energia metabolizável de grãos de milho e sorgo para aves, galinhas, suínos e porcas.

Fonte: Rostagno et al. (2017).

A utilização do grão de sorgo na alimentação animal evoluiu bastante nos últimos anos, principalmente pela considerável redução dos custos na ração, baixa contaminação por micotoxinas e pelo elevado desempenho zootécnico dos animais. Estudos da substituição do milho pelo sorgo foram feitos em frangos de corte (Diniz et al., 2002; Garcia et al., 2005, 2013; Fernandes et al., 2014b; Carvalho et al., 2015), em galinhas poedeiras (Reis, 2004; Assuena et al., 2008), codorna (Moura et al., 2010), perus (Ambrósio, 2014), suínos (Fialho et al., 2002; Antunes et al., 2008), bovinos (Passini et al., 2003; Balogun et al., 2005; Igarasi et al., 2008) e equinos (Gobesso et al., 2008), e concluíram que o sorgo pode ser utilizado em substituição ao milho, sem prejuízos ao desempenho dos animais ou da produção de ovos.

Estas pesquisas têm favorecido a comercialização do grão de sorgo, havendo hoje no mercado empresas realizando contratos futuros para compra do grão. Mesmo assim, o sorgo continua sendo uma cultura pouco divulgada no meio acadêmico, midiático e rural. Poucas faculdades possuem aulas sobre a cultura, sendo menos ainda o número de pesquisadores dedicados ao desenvolvimento da cultura.

Alguns trabalhos de pesquisa de alimentação de aves e animais no Brasil consideram ainda sorgo com e sem tanino, no entanto, 99% do sorgo nacional não possui tanino. Todo o sorgo plantado na safrinha, na região do Cerrado, não possui tanino. O pouco de sorgo com tanino produzido nacionalmente serve a mercados específicos, que não o de alimentação animal.

Sorgo Grão na Alimentação de Aves

A ração à base de sorgo é excelente opção para alimentação de aves, por ter menor custo que o milho, e apresentar o mesmo rendimento produtivo tanto de carne quanto de ovos. Cerca de 50% do sorgo granífero, produzido no Brasil, é destinado à alimentação de aves.

A composição nutricional bruta e a estrutura do grão de milho e de sorgo são similares. O milho tem cerca de um por cento a mais de óleo, enquanto o sorgo tem um por cento a mais de proteína bruta. Os grânulos de amido são similares em tamanho, formato e composição, no entanto no sorgo encontra-se cerca de três por cento a mais de amido. Embora os dois grãos sejam diferentes na forma e no tamanho, a maior diferença está na composição de aminoácidos e distribuição da proteína no endosperma do grão de sorgo, bem como a baixa concentração de pigmentos carotenoides e xantofila. No sorgo, a proteína periférica aos grânulos de amido é mais densa, dura e retarda a penetração de água, o que torna o seu valor energético para aves (3.204 kcal/kg) cerca de 5% menor em relação ao milho (Tabela 1).

Aves alimentadas com sorgo sem tanino apresentam desempenho e rendimento de carcaça semelhantes aos daquelas alimentadas com dieta à base de milho (Scheuermann, 1998; Fernandes et al., 2014a, 2014b).

Tabela 1. Composição química e valores energéticos do sorgo e do milho para aves.

Componentes	Sorgo	Milho
Energia metabolizável (kcal/kg)	3.204	3.364
Matéria Seca (%)	87,10	88,90
Proteína Bruta (PB)	8,75	7,86
Amido (%)	66,60	63,40
Fibra Bruta (FB)	2,89	1,73
Extrato Etéreo (%)	2,65	3,5
Cálcio (%)	0,03	0,02
Fósforo disponível (%)	0,07	0,06
Lisina (%)	0,20	0,23
Metionina (%)	0,15	0,16
Metionina + Cisteína (%)	0,30	0,33
Treonina (%)	0,28	0,31
Ácido Linoleico (%)	1,05	1,91
Xantofila (%) ¹	1,10	23

Fonte: Rostagno et al. (2017). ¹Scheuermann (1998).

Em alimentação de frangos, o grupo de pesquisa da Faculdade de Medicina Veterinária da Universidade Federal de Uberlândia demonstrou que as rações formuladas para o ciclo de produção do frango de corte, com base nos níveis nutricionais do milho, podem ser totalmente substituídas por rações formuladas com base nos níveis nutricionais do sorgo (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Consumo de ração (CR), peso vivo (PV), conversão alimentar (CA) e índice de eficiência (IEP) de frangos de corte machos submetidos a dietas de milho e sorgo aos 48 dias de idade.

Tratamento	CR (kg)	PV (kg)	CA	IEP
Milho	5,995	3,369	1,78	365,29
Sorgo	6,001	3,443	1,74	375,00
CV (%)	3,61	4,92	2,61	5,90

Fonte: Diniz et al. (2002).

Tabela 3. Consumo de ração (CR), peso vivo (PV), conversão alimentar (CA) e índice de eficiência (IEP) de frangos de corte fêmeas submetidos a dietas de milho e sorgo aos 48 dias de idade.

Tratamento	CR (kg)	PV (kg)	CA	IEP
Milho	5,513	2,704	2,04a	270,88b
Sorgo	5,288	2,809	1,88b	309,21a
CV (%)	4,07	5,12	4,33	7,92

Médias nas colunas com letras diferentes são significativas em nível de ($P < 0,05$).

Fonte: Diniz et al. (2002).

Os resultados demonstraram que o consumo de ração e peso vivo de machos foi igual entre os dois grãos (Diniz et al., 2002). A conversão alimentar foi igual para os machos, entretanto nas fêmeas a conversão alimentar com a dieta à base sorgo foi melhor, influenciando positivamente no Índice de Eficiência Produtiva (IEP), e este resultado foi proporcionado por um menor acúmulo de gordura na carcaça das fêmeas alimentadas com dietas de sorgo em relação àquelas alimentadas com dietas à base de milho.

Também em galinhas poedeiras (Reis, 2004) compararam-se três diferentes rações, sendo formuladas à base de milho (100), à base de milho: sorgo (50:50) e por último à base de sorgo (100) (Tabela 4). Demonstrou-se que a ração mista, milho e sorgo, bem como a ração à base de sorgo proporcionam às galinhas em postura os mesmos índices de produção e de massa de ovos, se comparadas à ração exclusiva à base de milho. Ressalta-se que o sorgo grão é pobre em pigmentos amarelos, não colorindo adequadamente a gema dos ovos. Enquanto o milho tem cerca de 1,8 ppm de caroteno e 19,0 ppm de xantofila, o sorgo grão tem respectivamente 0,2 ppm e 1,1 ppm (Moura et al., 2010). Desta forma, ao se utilizar o sorgo nas rações de galinhas poedeiras, existe a necessidade da adição de um corante natural ou artificial.

Tabela 4. Desempenho produtivo de poedeiras em rações com sorgo grão.

Parâmetros	100% milho	50%milho:50%sorgo	100% sorgo
Produção/a/al (%)	87,09	86,37	86,68
Ração(g/a/d)	109,13	107,84	107,61
Massa ovos (g)	1.534	1.527	1.543

Fonte: Reis (2004)

Características de desempenho zootécnico e rendimento de carcaça, de percentagem de carne de peito e coxa-sobrecoxa e de composições química e sensoriais não foram afetadas quando da substituição do milho pelo sorgo em frangos de corte (Garcia et al., 2005).

O grão de sorgo pode ser ofertado inteiro para a alimentação de aves sem influenciar seu desempenho, o que foi comprovado numa sequência de trabalhos de pesquisa, iniciando com Murta et al. (2004), comparando grão de sorgo triturado em moinho a martelo com peneiras de 1,200 mm (3,5% grãos inteiros) até peneiras de 9,525 mm (54% de grãos inteiros), não sendo encontrada nenhuma diferença de desempenho em frangos de corte. Fernandes et al. (2013) compararam o desempenho de frangos de corte, machos e fêmeas, aos 42 dias de idade arraçoados com dietas com diferentes formas físicas: (A) milho quebrado, (B) sorgo moído, (C) sorgo moído (50%): inteiro (50%), (D) sorgo inteiro, (E) milho moído. Não houve diferença para consumo de ração, peso vivo, conversão alimentar e viabilidade em ambos os sexos (Tabela 5).

Tabela 5. Desempenho de frangos de corte aos 42 dias de idade, com dietas de grãos moídos, mistos e inteiros.

TMT	CR(g)		PV (g)		CA		VB (%)	
	M	F	M	F	M	F	M	F
A	4173a	4034a	2,53a	2,43a	1,63a	1,63a	97,4a	95,2a
B	4268a	3914a	2,58a	2,38a	1,62a	1,63a	95,2a	96,3a
C	4268a	4058a	2,57a	2,46a	1,63a	1,62a	95,4a	96,2a
D	4201a	3958a	2,59a	2,43a	1,59a	1,61a	95,6a	96,1a
E	4216a	3856a	2,55a	2,39a	1,61a	1,60a	94,3a	95,6a

Médias com letras iguais na mesma coluna não diferem entre si estatisticamente ($p < 0,05$); CMR (consumo médio de ração); PV (peso vivo); CA (conversão alimentar); VB (viabilidade); M (Machos); F (Fêmeas); A- milho quebrado; B- sorgo moído; C- sorgo moído (50%): inteiro (50%); D-sorgo inteiro (100%); E- milho moído. Fonte: Fernandes et al. (2013)

Deste experimento, uma amostra de frangos, com pesos semelhantes, foi retirada para abate, não cruento, e depois de evisceradas a moela, o intestino delgado e o ceco, foi separada para estudos morfométricos e histológicos. Os resultados demonstraram que a inclusão de 50% ou 100% de sorgo grão inteiro promove aumento significativo de peso da moela e do intestino delgado (Tabela 6).

Tabela 6. Efeito da forma física das rações sobre o peso e tamanho do tubo gástrico intestinal de frangos de corte machos aos 42 dias de idade.

Tratamentos	Moela (g)	Intestino delgado		Ceco	
		(g)	(cm)	(g)	(cm)
Milho moído (A)	35,807b	46,476b	166,53	6,957	17,97b
Sorgo moído (C)	38,114b	48,410ab	170,84	7,084	18,97ab
Sorgo moído:inteiro (D)	42,101a	51,810ab	173,75	7,102	18,81ab
Sorgo inteiro (E)	44,468a	52,911a	175,28	7,379	19,53a
CV (%)	10,62	12,24	7,98	17,23	7,57

Fonte: Fernandes et al. (2013)

Análises histológicas das três porções do intestino delgado destas aves demonstraram que havia aumento da superfície de absorção das paredes intestinais em resposta à presença do sorgo inteiro (tratamento D ou E). Este conjunto de respostas de desempenho zootécnico, morfológico e histológico do tubo gástrico intestinal dos frangos demonstrou a capacidade de resposta do frango de corte à introdução do sorgo grão inteiro na dieta.

Trabalhos conduzidos por (Silva, et al., 2014, 2015; Silveira, 2014; Carvalho et al., 2015; Litz et al., 2020) concluíram que rações com grão de sorgo inteiro na alimentação de pintos de corte de um dia até os sete dias de idade, assim como no momento do abate, aos 42 dias, promovem destacada hipertrofia muscular na moela e aumento do intestino delgado, por causa do esforço deste órgão para reduzir o tamanho das partículas, influenciando a capacidade digestiva da ave, haja vista os resultados demonstrados por estes autores, para as variáveis consumo de ração, eficiência alimentar, peso vivo, rendimento de carcaça e viabilidade.

Por outro lado, o grão inteiro nas rações avícolas leva à diminuição dos custos da moagem dos grãos com significativo efeito de redução do custo industrial da fabricação das rações. A demanda de energia elétrica, intrínseca ao processo de moagem, representa o segundo maior custo energético da fábrica (Biagi, 1998), podendo a moagem representar até 30% dos custos industriais das rações (Dozier, 2002; Silva et al., 2014). Este benefício industrial associado ao custo de mercado do sorgo é responsável, especialmente, por maior competitividade em custo comparada à ração à base de milho, concorrendo para um custo final menor na produção de frangos.

A partir dos trabalhos acima elencados conclui-se que o sorgo grão moído ou inteiro, associado ao milho ou não, concorre com o milho nas dietas de frangos de corte, galinhas poedeiras e, porque não afirmar, no segmento de reprodução responsável pela oferta de pintinhos de um dia de corte e postura. Assim, o sorgo pode e deve ser considerado como alimento de participação nas dietas avícolas em condições de igualdade de desempenho zootécnico, rendimentos de carcaça e qualidade de carne e ovos, além de concorrer para uma redução dos custos das rações.

Cabe ainda destacar, em relação à aplicabilidade do sorgo na nutrição de aves, que trabalhos de Ambrósio et al. (2013) não observaram alterações nos parâmetros de desempenho de peruzinhos de corte do alojamento aos 28 dias, ao substituir parcialmente e integralmente o milho pelo sorgo moído e inteiro nas rações. Por outro lado, Etuk e Ukaejiofo (2007) observaram melhor desempenho em perus de 0 a 6 semanas alimentados com rações contendo 50% milho e 50% sorgo. O uso de sorgo em dietas para gansos foi estudado por Arroyo et al. (2013a, 2013b), avaliando a qualidade do *foie grass* e características de desempenho das aves. Concluíram que a substituição integral do milho pelo sorgo resultou em melhor conversão alimentar e maior peso de fígado, enquanto o peso vivo e consumo se equipararam à ração à base de milho, muito embora tenham observado que o fígado apresentava uma coloração amarela mais clara.

Sorgo Grão na Alimentação de Suínos

O valor energético do sorgo nas rações para suínos equivale a 100% do valor do milho (Rostagno et al., 2017), o que tem incentivado o seu uso pelas granjas. Conforme mostrado na Tabela 7, a substituição do milho pelo sorgo na dieta de leitões em recria (10 kg aos 30 kg) não influenciou a retenção de nitrogênio, o coeficiente de digestibilidade da proteína bruta, a energia digestível e a energia metabolizável dos leitões (Fialho et al., 2002).

Rodrigues et al. (2002) avaliaram o efeito da suplementação de um complexo enzimático sobre a digestibilidade de nutrientes e o desempenho de suínos em fase de terminação (30 kg aos 90 kg) submetidos a rações formuladas com milho ou sorgo. A suplementação influenciou positivamente nas rações formuladas com milho. As rações formuladas para suínos à base de sorgo com e sem suplementação enzimática proporcionaram um desempenho semelhante. As dietas formuladas com sorgo propiciaram um ganho de peso maior (6%) do que aquelas formuladas com milho (Tabela 8).

Tabela 7. Dados de desempenho e valores de digestibilidade dos nutrientes das rações dos leitões dos 10 kg aos 30 kg, contendo diferentes níveis de substituição do milho pelo sorgo.

Parâmetros	Substituição do milho pelo sorgo (%)				
	0	33	66	100	CV (%)
Peso Inicial (kg)	9,4	9,7	9,3	9,4	4,67
Peso Final (kg)	28,8	28,1	27,6	28	4,34
Período Experimental (dias)	30	30	30	30	-
Ganho Médio Diário (g)	648	613	610	620	6,93
Consumo Médio Diário (kg)	1,21	1,23	1,2	1,25	4,28
Conversão Alimentar	1,86	2	1,96	2,02	6,91
Dados de Digestibilidade Nutrientes da Ração					
Digestibilidade da Proteína (%)	84,59	84,83	85,65	85,78	3,55
Retenção de Nitrogênio (g/dia)	21,20	19,11	19,13	19,07	2,78
Energia Digestível (kcal/kg)	3.821	3.789	3.818	3.793	3,13
Energia Metabolizável (kcal/kg)	3.619	3.562	3.608	3.670	2,19

Fonte: Fialho et al. (2002).

Estudos com substituição de 100% do milho por sorgo sem tanino (Braun et al., 2007) e inclusão de 20% de sorgo (Herrera et al., 2013), na alimentação de suínos, mostraram resultados equivalentes para os dois cereais.

A granulometria da ração de sorgo para suínos deve ser levada em consideração, pois para facilitar a digestão o grão de sorgo deve ser finamente moído. A moagem do grão de sorgo deve ser feita com peneira entre 1,2 mm e 2,2 mm, pois a granulometria das rações para suínos requer um Diâmetro Geométrico Médio (DGM) de cerca de 650 a 750 μm . A moagem em moinhos a martelos nas peneiras de 4,76 mm, tradicionalmente usada na moagem de milho nas fábricas de rações comerciais ou ligadas diretamente ao sistema de produção, deixa passar cerca de 18% a 20% de grão de sorgo inteiros, uma parcela da dieta que ao longo do tubo gastrointestinal desta espécie não seria digerida e conseqüentemente eliminada através das fezes (Murta et al., 2004; Fernandes et al., 2013).

Tabela 8. Ganho de peso médio diário (GPMD), consumo de ração médio diário (CMDR) e conversão alimentar (CA) dos suínos durante o período de crescimento e terminação (30 kg - 90 kg), recebendo dietas com milho ou sorgo sem (SSE) ou com suplementação enzimática (CSE).

TMT	GPMD (g)			CMDR (g)			CA (g g ⁻¹)		
	SSE	CSE	Média	SSE	CSE	Média	SSE	CSE	Média
Milho	898	938	918	2727	2745	2736	3,04	2,93	2,99
Sorgo	920	905	913	2880	2809	2845	3,13	3,11	3,12
Média	909	921		2804	2777		3,09	3,02	
CV (%)	5,07			7,07			6,65		

Fonte: Rodrigues et al. (2002).

O perfil de ácidos graxos da dieta fornecida aos porcos influencia o valor de iodo da gordura da carcaça, uma medida da firmeza dessa gordura. Atualmente a qualidade da gordura é extremamente importante na indústria de processamento de carne de porco. Os produtos à base de carne de porco com gordura macia (ácidos graxos mais insaturados) são discriminados, pois podem ficar rançosos mais rapidamente, e as barrigas são mais difíceis de cortar para bacon, pois a gordura tem maior tendência a “manchar”, resultando em um produto menos desejável.

Um perfil de ácidos graxos mais favorável (menos gordura insaturada) tem no grão de sorgo uma vantagem distinta sobre o milho na melhoria da qualidade da gordura de porco. Pesquisas mostraram que os porcos alimentados com dietas à base de sorgo tinham menos ácido linoleico e ácidos graxos poli-insaturados na gordura da região das costas e do queixo que os porcos alimentados com milho (Benz et al., 2010). Mais recentemente, Jordan et al. (2015) também observaram gordura mais firme (valor diminuído de iodo) de porcos alimentados com dietas à base de sorgo versus milho. Esses estudos confirmam que porcos alimentados com dietas à base de sorgo terão gordura mais firme do que aqueles alimentados com milho.

Sorgo Grão na Alimentação de Bovinos

O sorgo é o segundo cereal mais utilizado nos confinamentos de bovinos, após o milho. O grão de sorgo tem potencial de uso em dietas de ruminantes, sem alterações no metabolismo do animal ou no desempenho produtivo. O valor energético do sorgo, quando devidamente processado, é por volta de 95 a 100% do valor do milho (Valadares Filho et al., 2006; Igarasi et al., 2008) (Tabela 9).

Tabela 9. Composição química do grão de milho e de sorgo na alimentação de bovinos.

Parâmetros	Milho	Sorgo
Matéria Seca (%)	87,64	87,9
Proteína Bruta (%)	9,11	9,54
Extrato Etéreo (%)	4,07	3,03
FDN (%)	13,98	14,21
FDA (%)	4,08	6,3
Extrato não nitrogenado (%)	74,1	71,92
Carboidratos não fibrosos (%)	74,47	73,84
Hemiceluloses (%)	9,41	9,62
Celulose (%)	3,55	3,55
Lignina (%)	1,16	1,21
NDT	87,24	80,35
Energia bruta (Kcal/ka)	4310	4130
Ca (%)	0,03	0,04
P (%)	0,25	0,28

Fonte: Valadares Filho et al. (2006).

O menor valor energético ocorre pela maior presença de proteínas (prolaminas) que envolvem os grânulos de amido, dificultando a digestibilidade (Santos et al., 2004; Owens; Zinn, 2005), podendo ser contornado por técnicas de processamento do grão, visando melhorar a eficiência de digestão do amido.

A principal forma de processamento de grãos de cereais na ração é a moagem, a qual deve resultar em partículas entre 0,7 mm e 1,2 mm (Santos et al., 2004). Processos de silagem de grãos úmidos e a floculação, via de regra, são mais eficientes em aumentar a disponibilidade da energia dos grãos (Owens et al., 1997; Theurer et al., 1999) do que somente a moagem. O recomendado é flocular o sorgo para se obter densidade entre 310 e 360 g/L (Brown et al., 2000; Zinn et al., 2002). Grãos menos processados não melhoram a digestibilidade, e grãos excessivamente processados aumentam o risco de acidose ruminal.

Os resultados de ganho e eficiência são muitos dependentes do tipo de processamento do grão. Huck et al. (1999) observaram que o sorgo

floculado foi superior ao milho laminado ou moído grosso para bovinos em terminação. O consumo de matéria seca não foi alterado, mas o ganho de peso diário e a eficiência foram 5% maiores no sorgo floculado em comparação ao milho laminado a seco. No entanto, Santos et al. (2004) observaram em revisões de trabalhos que o milho apresentou consumo médio de matéria seca 2,5% menor, ganho de peso diário 5,2% maior, eficiência alimentar 7,6% maior que o sorgo. Clarindo et al. (2008) trabalharam com milho e/ou sorgo moídos com partículas entre 1,0 mm e 1,2 mm. Neste estudo o consumo de matéria seca e valor energético foram similares (Tabela 10), mostrando que a moagem fina pode ter diminuído as diferenças na digestibilidade do amido entre os dois cereais.

Tabela 10. Desempenho de tourinhos alimentados com diferentes fontes energéticas e proteicas.

Parâmetros	Tratamentos ¹					
	MFS	MU	SFS	SU	EPM	E ²
Peso corporal inicial (kg)	415,2	418,3	418,5	418,5	7,314	0,814
Peso corporal final (kg)	548,7	531,0	542,8	525,5	13,96	0,690
Ganho de peso diário (kg/d)	1,505	1,265	1,396	1,191	0,098	0,365
Consumo MF (kg/d)	8,991	9,227	8,787	8,898	0,234	0,271
Espessura de gordura subcutânea (cm)	0,722	0,622	0,653	0,637	0,039	0,538
Eficiência alimentar	0,168	0,137	0,159	0,133	0,011	0,135

¹ MFS: milho moído fino + farelo de soja; MU: milho moído fino + ureia; SFS: sorgo moído fino + farelo de soja; SU: sorgo moído fino + ureia. ² E: efeito da fonte energética; P: efeito da fonte proteica; ExP: efeito da interação fonte energética e proteica. Fonte: Clarindo et al. (2008).

O milho utilizado no Brasil é tipo *flint*, diferente do tipo *dent*, usado no Hemisfério Norte, por isso este milho é mais similar ao sorgo na sua digestibilidade do amido.

Os custos, por quilo de ganho de peso de bezerros alimentados após o desmame até o abate com rações contendo sorgo, foram mais baixos do que o das rações formuladas com milho (Almeida Júnior et al., 2008). Neste trabalho os autores testaram milho seco moído; silagem de grãos úmidos de milho; sorgo seco com tanino moído; silagem de grãos úmidos inteiros de

sorgo com tanino; sorgo seco sem tanino moído e silagem de grãos úmidos inteiros de sorgo sem tanino, constatando que todos os alimentos avaliados podem ser usados em rações concentradas para bezerros após o desmame, pois não comprometem o desempenho e conferem resultados similares (Tabela 11).

Tabela 11. Desempenho dos bezerros alimentados com as rações concentradas.

Parâmetros	MM	SGUM	SCTM	SGUISCT	SSTM	SGUISST	CV%	P<
Peso inicial (kg)	77,24	78,24	80,36	81,78	80,04	78,32	10,3	ns ¹
Peso final (kg)	170,86	174,16	171,32	169,62	172,2	171,48	4,26	ns
Ganho total de peso vivo (kg)	93,62	95,92	90,96	87,84	92,16	93,16	8,97	ns

MM - milho seco moído; SGUM - silagem de grãos úmidos de milho; SCTM - sorgo seco com tanino moído; SGUISCT - silagem de grãos úmidos inteiros de sorgo com tanino; SSTM - sorgo seco sem tanino moído; SGUISST - silagem de grãos úmidos inteiros de sorgo sem tanino.¹ Não significativo - $P > 0,05$.

Fonte: Almeida Júnior et al. (2008).

Vários estudos mostram que o sorgo moído, laminado ou floculado pode substituir o milho, mantendo o mesmo nível de produção das vacas em lactação, sem comprometimento na composição do leite (Mitzner et al., 1994; Chen et al., 1994; Theurer et al., 1999). O sorgo floculado apresenta maior teor de energia líquida que o laminado, e este é superior ao do grão moído.

Vacas de alta produção apresentam desempenho semelhante quando suplementadas com sorgo ou milho, para o mesmo nível de processamento do grão (laminado ou floculado), resultando em similares produções e composições do leite (Mitzner et al., 1994; Chen et al., 1994; Theurer et al., 1999). A ingestão de matéria seca, as produções de leite, leite corrigido para 3% de gordura, a eficiência produtiva e os teores de proteína e gordura do leite não diferiram entre os animais suplementados com sorgo ou milho. Vacas alimentadas com sorgo ou milho floculado em combinação com proteína não degradada no rúmen produziram mais leite e proteína do leite em comparação àquelas suplementadas com milho laminado ou com farelo de soja (Santos et al., 1999).

As respostas produtivas de vacas de alta (45 kg) ou média (35 kg) produção de leite suplementadas com sorgo floculado variam com a degradabilidade da proteína suplementar. Em vacas de média

produção, a suplementação com ureia (0,8% da MS da dieta), associada à alta disponibilidade de amido fermentável no rúmen, proveniente do sorgo floculado, garante maior consumo de alimento e síntese de proteína microbiana suficiente para proporcionar aumento na produção de leite. Já em vacas de alta produção, as respostas são inversas, e a maior produção de leite foi obtida com a suplementação com farelo de soja (6,0%) ou farinha de peixe (5,0%), sem alterar o consumo de alimento. Em animais de alta produção, apesar da maximização da síntese proteica microbiana proporcionada pelo sorgo floculado, há a necessidade de suplementação com proteína não degradável no rúmen (Santos et al., 1998).

Theurer et al. (1999) resumiram os dados de vários experimentos comparando o efeito da utilização de grão de milho ou sorgo, bem como o seu processamento sobre o desempenho de vacas de alta produção. De acordo com estes autores, a floculação melhorou a produção e a eficiência de produção de leite em 5,0%, aumentou o teor e a produção de proteína do leite, bem como a digestibilidade aparente do amido em 16,0% comparado ao sorgo laminado a seco. Contudo, houve redução no teor de gordura do leite, mas sem comprometer a produção de gordura (g/dia). O melhor desempenho está associado à melhor qualidade nutricional promovida pelo processamento, já que o consumo de matéria seca e o teor de nitrogênio ureico do leite (NUL) não foram alterados.

Vacas aos 45 ou 90 dias pós-parto, alimentadas com dietas à base de sorgo floculado e milho laminado, mostraram as mesmas condições energéticas e respostas reprodutivas (Santos et al., 2000). Os animais que receberam sorgo floculado apresentaram menores perdas de escore corporal durante os primeiros 45 dias ($p < 0,05$) e 90 dias ($p < 0,06$), com tendência em aumentar o balanço energético das vacas ($p < 0,11$). Delgado-Elorduy et al. (2002a, 2002b) avaliaram o metabolismo esplênico e o metabolismo de nitrogênio na glândula mamária de vacas leiteiras com produção média de 28 kg/dia e 86 dias em lactação, alimentadas com grãos moídos (sorgo ou milho) e processados (laminação ou floculação). Esses autores não observaram diferença ($p < 0,05$) na ingestão de matéria seca, proteína bruta, amido e energia líquida de lactação entre os tratamentos. A produção e a composição do leite e a eficiência alimentar e produtiva das vacas foram semelhantes, com exceção do teor de gordura, que foi superior para a dieta com sorgo laminado.

Etanol de Grãos de Sorgo

A produção de etanol é realizada a partir de culturas agrícolas, como cana-de-açúcar, milho, sorgo, beterraba, mandioca e batata. O Brasil por excelência é o maior produtor de etanol a partir da cana-de-açúcar. Desde 2012 já existem usinas, chamadas flex, produzindo etanol a partir de grãos de milho e sorgo, especialmente no estado de Mato Grosso, algumas para ocupar suas estruturas no período de entressafra de cana-de-açúcar, outras para aproveitar o baixo custo do grão na região.

O grão de sorgo pode ser usado para produção de etanol, em usinas flex. No Brasil sua utilização ainda é mínima, mas nos Estados Unidos estima-se que 28% do sorgo granífero colhido são usados para produção de etanol (Kubecka, 2011; Dweikat, 2012). O processo de fermentação do amido em etanol é semelhante para todos os grãos. Essencialmente, o amido (polímero de glicose) é convertido em açúcar com uso de enzimas, e este açúcar é depois fermentado para produzir etanol. Existem dois métodos de produção de etanol de grãos, a saber, moagem úmida e processos de moagem a seco (Nichols; Bothast, 2008). No processo de moagem a seco, a sacarificação e a fermentação ocorrem simultaneamente após a moagem a seco do grão. No processo de moagem úmida, a sacarificação e a fermentação são realizadas em etapas separadas. O amido no processo de moagem úmida é bastante puro, permitindo a separação de outros componentes, como proteínas, lipídios, vitaminas e fibras.

A produção de etanol de grão de sorgo é bem similar à de milho, alguma variação pode ocorrer dependendo da cultivar, ou do tipo de fermentação e moagem. Shapouri e Salassi (2006) obtiveram produção de 395 e 402 litros de etanol por tonelada de grãos, em milho e sorgo, respectivamente. O sorgo pode produzir a mesma quantidade de etanol por área que outros cereais, enquanto usa até um terço a menos de água no processo de crescimento da planta (Kubecka, 2011). Aproximadamente 30% a 35% da safra de sorgo nos Estados Unidos são usadas para a produção de etanol combustível, respondendo por cerca de 2% da produção de etanol combustível desse país (Kubecka, 2011). Os grãos secos destilados com solúveis são um subproduto do processo de destilação e desidratação durante a produção de etanol (Moreau et al., 2012).

Grãos Secos Destilados

As pesquisas com uso de grãos secos destilados com solúveis de sorgo (DDGS) na alimentação animal são recentes. A composição química do DDGS de sorgo é similar à do DDGS de milho (Tabela 9), e o valor nutritivo de DDGS de milho e sorgo foi relatado como sendo semelhante em estudos de alimentação de bovinos de corte e ovinos (Lodge et al., 1997; Harborth et al., 2006).

Para remover a fibra não fermentável do grão de sorgo usa-se a decorticação, que é um processo de descascamento abrasivo. Deste processo, o DDGS resultante é valioso, especialmente como alimentos para não ruminantes porque são mais ricos em proteínas e mais baixos em fibras (Corredor et al., 2006). A composição de aminoácidos do grão de sorgo e DDGS é semelhante à do grão de milho e DDGS de milho (Tabela 12).

Semelhante ao milho, o valor nutricional do DDGS do sorgo dependerá de sua concentração de óleo, que é muito importante na alimentação de suínos. O DDGS de sorgo pode ter um teor de óleo ligeiramente menor que o DDGS de milho, mas, novamente, pode variar com base nos procedimentos de extração de óleo na planta de etanol (Corredor et al., 2006). Jacela et al. (2010) obtiveram valores de Energia Bruta, Energia Digestível e Energia Metabolizável do DDGS de milho maiores que o de sorgo, sendo para o DDGS de milho valores de 5.293, 3.703 e 3.426 kcal/kg de MS, respectivamente, e para DDGS de sorgo valores de 5.108, 3.878, 3.549 kcal/kg de MS. A energia bruta de sorgo para suínos foi de 5.302 kcal/kg (Stein et al., 2016), valor semelhante aos encontrados por Jacela et al. (2010) com DDGS de milho. Recomenda-se adicionar no máximo 30% de DDGS de sorgo na alimentação de suínos (Feoli et al., 2008).

Alguns aminoácidos como isoleucina, metionina e valina estão em maiores concentrações em DDGS de milho e sorgo comparados aos próprios grãos *in natura* (Sotak et al., 2015).

Tabela 12. Composição de proteína bruta e aminoácidos de grãos de milho e sorgo e seus DDGS (% do peso da amostra seca), em dietas para suínos.

Parâmetros	Grão milho	DDGS milho	Grão sorgo	DDGS sorgo
Proteína bruta	8,0	27,5	9,8	31,0
Amino ácidos				
Arginina	0,39	1,16	0,32	1,10
Histidina	0,23	0,72	0,23	0,71
Isoleucina	0,28	1,01	0,37	1,36
Leucina	0,95	3,17	1,25	4,17
Lisina	0,24	0,78	0,20	0,68
Metionina	0,21	0,55	0,18	0,53
Fenilalanina	0,38	1,34	0,47	1,68
Treonina	0,26	1,06	0,29	1,07
Triptofano	0,09	0,21	0,07	0,35
Valina	0,38	1,35	0,48	1,65
Alanina	0,58	1,94	0,86	2,90
Ácido aspártico	0,55	1,83	0,60	2,17
Cisteína	0,16	0,53	0,18	0,49
Ácido Glutâmico	1,48	4,37	1,92	6,31
Glicina	0,31	1,02	0,29	1,03
Prolina	0,70	2,09	0,77	1,4
Serina	0,38	1,18	0,37	2,50
Tirosina	0,27	1,01	0,25	nr

Fonte: Adaptado de Moreau et al. (2012).

Silagem de Sorgo de Planta Inteira

A planta inteira do sorgo pode ser utilizada como fonte de alimento volumoso para ruminantes. Ela é utilizada principalmente na forma de silagem, rolão (planta inteira seca), feno, pastejo ou corte. Para cada forma de utilização, existe um tipo de sorgo adequado. Para a produção de silagem, recomenda-se o plantio de cultivares de sorgo silageiro ou forrageiro. Para a utilização do sorgo em pastejo ou em manejo de corte, recomenda-se o plantio de variedades forrageiras adaptadas a essa finalidade, bem como seus

híbridos com o capim-sudão.

Os sorgos forrageiros ou de porte alto apresentam ciclos mais longos, alturas superiores a dois metros e caracterizam-se pela grande capacidade de produção de matéria verde. Essas cultivares podem ser subdivididas em: a) forrageiros com alta produção de grãos e baixo teor de açúcares solúveis; b) forrageiros com baixa produção de grãos, alta percentagem de açúcares solúveis (10% a 14%) no colmo e altura próxima a 3 m, também conhecidos por sorgos sacarinos; c) forrageiros com pequena percentagem de grãos (normalmente muito pequenos) e panículas abertas e bem ramificadas; d) forrageiros especializados para pastejo, corte ou fenação (sorgo ou capim-sudão e seus híbridos com o sorgo).

Os sorgos de duplo propósito ou de porte médio apresentam boa produção de grãos (30% a 40% de grãos). Com relação à altura, são menores que os forrageiros, porém maiores do que os graníferos (2 m a 2,5 m).

Em condições normais de cultivo, a silagem de sorgo é um pouco inferior à silagem de milho, principalmente no que diz respeito à digestibilidade. Em condição de baixos regimes pluviométricos e elevadas temperaturas, a silagem de sorgo pode ser superior à silagem de milho. Essa condição é muito comum em regiões semiáridas e na segunda safra ou em plantios atrasados no Cerrado brasileiro.

O rendimento de massa seca por hectare é maior para o sorgo silageiro do que para o milho, sendo ainda possível cultivar a rebrota. O cultivo de sorgo forrageiro poderá alcançar, no primeiro corte, de 15 a 20 t ha⁻¹ de matéria seca, ou seja, de 45 a 60 t de forragem verde por hectare. O sorgo possui capacidade de rebrota, o que possibilita uma produção de 40% a 60% do que foi obtido no primeiro corte.

O sorgo é uma das culturas que mais se destacam na produção de silagens, em razão de suas características intrínsecas (alta quantidade de carboidratos solúveis, baixo poder tampão, teor de matéria seca acima de 25% no momento da ensilagem e estrutura física que permite boa compactação nos silos), enquadrando-se perfeitamente entre as forrageiras desejadas para produção de silagens de boa qualidade.

Na Tabela 13 estão apresentados os dados qualitativos médios da forragem de sorgo e de milho, com seus respectivos teores de matéria seca (MS), proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose, hemicelulose, lignina, pH e nutrientes digestíveis totais (NDT). De forma geral, o sorgo possui maior proteína,

FDN, FDA e lignina, e menor NDT, mas isso não influencia no rendimento animal. Dietas contendo silagem de sorgo de boa qualidade, associadas a níveis de 20, 35, 50 e 65% de concentrado, não influenciam os consumos de matéria seca, proteína bruta e nutrientes digestíveis totais, expressos em kg/dia, bem como o ganho de peso e a conversão alimentar dos animais (Pereira et al., 2006).

Tabela 13. Composição química média e pH de silagens de sorgo e milho (dados expressos na matéria seca).

Parâmetros	Silagem de milho	Silagem de sorgo
MS total (%)	30 – 35	28 – 32
PB (%)	6 – 8	6 – 9
FDN (%)	45 – 60	50 – 60
FDA (%)	23 – 43	23 – 50
Celulose (%)	24 – 35	17 – 38
Hemicel. (%)	21 – 30	13 – 23
Lignina	3 – 5	5 – 11
PH	3,8 – 4,0	3,8 – 4,2
NDT (%)	65 – 75	55 – 65

Fonte: Adaptado de Zago (1991, 2001), Andrade et al. (2001), Freitas (2002), Evangelista e Lima (2002), Nussio et al. (2002), Mello (2004), Tomich et al. (2003), Pires (2003), Valadares Filho et al. (2006) e Daniel et al. (2011).

Neumann et al. (2007) mostraram que a silagem de sorgo para novilhos, quando associada à suplementação de concentrado, na proporção de 1,2% do peso vivo, não apresentou limitação energética para propiciar ingestões de matéria seca e ganhos de peso similares às dietas com silagem de milho, reduzindo os custos de produção.

Fernandes et al. (2009) avaliaram o ganho de peso/animal/dia, o consumo e a conversão alimentar dos bovinos terminados em condições de confinamento total, alimentados com silagem de diferentes cultivares de milho e sorgo, utilizando 33 bovinos da raça Gir, machos, com peso vivo médio inicial de 230 kg, alojando-se um animal por baia (Tabela 14). O confinamento teve duração de 108 dias, sendo 14 dias de adaptação e 94 dias de avaliação. Quanto ao desempenho animal pôde-se verificar diferença ($P < 0,05$) entre as cultivares avaliadas (Tabela 11). Identificou-se variação

no ganho de peso de bovinos entre 1,39 kg/bovino/dia (A25A23) e 1,04 kg/bovino/dia (A 9404), sendo os maiores ganhos encontrados nas cultivares de milho - 1,39 kg/dia (A25 A23), e de sorgo - 1,27 kg/dia (BRS 610). O ganho de peso encontrado foi superior ao planejado (1,1 kg/dia), sendo o resultado compatível com o desempenho de bovinos da raça Gir.

Tabela 14. Ganho médio diário (GMD), consumo de matéria seca do volumoso (CMSV), consumo de matéria seca total (CMST) e conversão alimentar (CA) de bovinos Gir mantidos em confinamento alimentados com silagem de híbridos de sorgo e milho.

Tratamentos	GMD (kg/dia)	CMSV (kg MS/dia)	CMST (kg MS/dia)	CA (kg MS/kg PV)
Milho - A25A23	1,39A	5,4ABC	8,0ABC	5,8
Milho - GNZ2728	1,36AB	6,0A	8,6A	6,3
Milho - 2C577	1,27ABC	5,3ABC	7,9ABC	6,3
Milho - DAS519	1,23ABC	5,0ABC	7,6ABC	6,3
Milho - A3663	1,19ABC	4,8C	7,4C	6,2
Milho- Farroupilha 25	1,14ABC	5,1ABC	7,7ABC	6,8
Milho - AG1051	1,09ABC	5,1ABC	7,7ABC	7,1
Sorgo - BRS610	1,27ABC	5,9AB	8,5AB	6,7
Sorgo - 1F305	1,22ABC	5,4ABC	8,0ABC	6,5
Sorgo - Volumax	1,07BC	4,7C	7,3C	6,9
Sorgo - A9404	1,04C	4,9BC	7,5BC	7,2
CV (%)	8,6	6,5	4,3	9,8

Fonte: Fernandes et al. (2009). Médias na mesma coluna seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Há grande variabilidade na composição de nutrientes nos diferentes híbridos de sorgo. Estas variações devem-se principalmente a diferentes proporções entre colmo, folhas e panícula, bem como às diferenças no valor nutritivo destas frações entre os híbridos. Isso reflete a enorme variabilidade genética entre os genótipos e o potencial do melhoramento genético no desenvolvimento de híbridos modernos de alto valor nutritivo, que proporcionariam alto desempenho animal semelhante ou superior aos obtidos com silagens de bons híbridos de milho. Em híbridos de sorgo de

porte médio ou baixo, e principalmente se tiverem maior proporção de grãos, normalmente os teores de proteína bruta têm se mostrado superiores aos de porte alto em função de maior participação das folhas, panículas e grãos na massa ensilada. Diferenças entre regiões, épocas de cultivos e manejo de ensilagem, como altura de corte, são fatores que também influenciam nas diferentes respostas sobre a composição química entre as silagens de sorgo.

Na literatura existem vários trabalhos comparando silagens de sorgo e milho no desempenho animal de gado de leite. Não foram observadas por estes autores diferenças no consumo de matéria seca, na produção e composição do leite, referentes ao fornecimento das respectivas silagens (Lusk et al., 1984; Nichols et al., 1998; Dias et al. (2001). Lusk et al. (1984), avaliando silagens de milho e sorgo, não observaram diferenças na produção de leite (24,4 x 24,7 L/dia) e encontraram valores de digestibilidade aparente da matéria seca variando de 59,8% a 61,4% e de 58,3% a 58,8%, para milho e sorgo, respectivamente. No entanto, Lusk et al. (1984) e Gomide et al. (1987) encontraram ingestões de matéria seca maiores para silagens de sorgo que para silagens de milho (1,83% x 2,64% do peso vivo (PV) e 1,68% e 2,00% PV, respectivamente, para milho e sorgo). Bezerra et al. (1993), analisando o valor nutricional de silagens de milho, milho consorciado com sorgo e rebrotas de sorgo, encontraram maiores valores de consumo de matéria seca (66,7 g/UTM- unidade de tamanho metabólico), de proteína bruta (7,7 g/UTM), de proteína digestível (4,8 g/UTM) e de energia bruta (325,4 Kcal/UTM) para as silagens de rebrota de sorgo aos 98 dias.

Sorgo Pastejo

O sorgo forrageiro compreende um tipo de sorgo de porte alto, com altura de planta superior a dois metros, muitas folhas, panículas abertas, com poucas sementes e elevada produção de forragem. Pode ser chamado também de silageiro pelo fato de sua aptidão ser principalmente para silagem. O sorgo-sudanense (*Sorghum sudanense*) – também denominado de sorgo-sudão, capim-sudão e sorgo-sudan – possui as seguintes características: apresenta ciclo precoce, é colhido em intervalos de 40 a 50 dias, possui porte médio, elevado valor nutritivo de forragem e aptidão principal para feno e pastejo, além de suportar mais o pisoteio animal.

O valor nutritivo dos híbridos de sorgo-sudão com sorgo bicolor tem pouca variação entre os diferentes materiais, entretanto há um efeito drástico da época de colheita sobre a qualidade nutricional. O teor de proteína da

forragem diminui drasticamente à medida que a planta se desenvolve, e o mesmo fato acontece com a digestibilidade da proteína, em razão do aumento significativo de fibra.

Analisando a qualidade nutritiva do sorgo de corte e pastejo, nas condições de Sete Lagoas-MG, e no ponto de pastejo (1,00 m a 1,20 m de altura), tem-se encontrado no híbrido BRS 800 valores entre 9% e 12% de proteína bruta no colmo, 15% e 18% nas folhas e 12% e 16% na planta inteira. Nesse mesmo híbrido, no estágio de emborrachamento, a quantidade de folhas equivale a cerca de 30% da massa verde.

Existe também o sorgo pastejo BMR (*brown midrib*) que possui plantas caracterizadas pela presença de pigmentos amarronzados na nervura central das folhas e no colmo. O interesse pelos genótipos de capim-sudão mutantes BMR tem aumentado pelo fato de eles apresentarem menores teores de lignina e, conseqüentemente, maior digestibilidade. O híbrido de sorgo BRS 810, da Embrapa Milho e Sorgo, é um exemplo de sorgo BMR. Com a presença de uma nervura ou listra marrom central em suas folhas, essa cultivar apresenta menor teor de lignina e maior potencial de redução do teor de fibra em detergente neutro (FDN). A presença dessa fibra tem efeito de enchimento do rúmen, ou seja, quanto menor a porcentagem de FDN, maior será o consumo pelo animal.

Silagem de Grãos Úmidos de Sorgo

A conservação de grãos de cereais na forma úmida tem sido uma das tecnologias de maior expansão no setor produtivo pela sua eficiência no contexto qualitativo e quantitativo de conservação do concentrado energético empregado na alimentação animal, especialmente na terminação de bovinos de corte (Costa et al., 2002).

A silagem de grão úmido é uma técnica que vem apresentando acentuado crescimento em quase todas as regiões produtoras de grãos do Brasil. Esta modalidade de silagem representa redução de custos na alimentação animal que pode chegar a 30% no caso da bovinocultura de corte, 20% na criação de gado leiteiro e na suinocultura pode variar de 15 a 25%. É um processo de ensilagem em que se estocam somente os grãos da planta. A colheita é feita com colheitadeira de grãos convencional e deve ser realizada quando a umidade dos grãos estiver entre 30 e 40% (Nunmer Filho, 2001).

Em alguns ambientes, a ensilagem pode ser a melhor escolha para

reduzir as perdas de colheita e armazenamento. Normalmente, são esperadas perdas de matéria seca de 5 a 15% no processo de ensilagem, que podem ser potencializadas pela retirada lenta da silagem, levando meses para esvaziar um silo. As perdas são menores quando o silo é aberto e rapidamente esvaziado (Muck, 2011).

Após a colheita, os grãos devem ser moídos finos (suínos), quebrados ou laminados (bovinos de corte e leite e ovinos), com o objetivo principal de favorecer a compactação. Os grãos devem ser armazenados em silos tipo bunker, trincheira ou bags, bem compactados e cobertos com lona plástica preta ou de dupla face (Nummer Filho, 2001).

No processo de ensilagem normal, a preservação é causada por uma combinação da exclusão de oxigênio e da fermentação natural dos açúcares por bactérias, em ácido láctico e outros produtos, diminuindo o pH. A falta de oxigênio impede o desenvolvimento de microrganismos aeróbios, enquanto o pH baixo é o principal mecanismo inibidor do crescimento de microrganismos anaeróbios (Muck, 2011).

Dentre as vantagens, a silagem de grão úmido é ótima opção para armazenar grãos por longo período, com baixo custo e, principalmente, mantendo o valor nutricional. Uma silagem de grão úmido de qualidade depende da escolha de híbridos que apresentem grãos saudios e alto valor nutricional. A colheita é antecipada em três a quatro semanas, e não existem taxas, impostos, transporte do produto para a cooperativa ou fábrica de rações, desconto de umidade, impurezas e grãos ardidos. A silagem de grão úmido possui maior digestibilidade e tem alta concentração de energia. Seu custo independe do preço de mercado (Nummer Filho, 2001).

Como desvantagens, a silagem de grão úmido apresenta dificuldade ou impossibilidade de comercialização, necessita de preparo diário da dieta aos animais (Nummer Filho, 2001) e pode ter presença de micotoxinas (Jobim et al., 2003). O sorgo possui vantagem em relação ao milho neste sentido por apresentar menos micotoxinas.

Peixoto et al. (2003), comparando o grão seco moído com a silagem de grão úmido de sorgo no desempenho de bezerras de diferentes grupos genéticos em confinamento, não verificaram diferenças no desempenho e na conversão alimentar dos animais. Para estes autores, a decisão entre qual fonte energética utilizar deve ser tomada em função de questões operacionais e econômicas, que são próprias de cada sistema de produção. Já Nikkhah et al. (2004) compararam o uso de sorgo seco moído ou floculado a vapor para

vacas leiteiras no meio da lactação e constataram que a floculação a vapor garantiu maior produção de leite, corrigido para gordura e proteína.

Igarasi et al. (2008) avaliaram silagens de grãos úmidos de milho (TMU) ou grãos úmidos de sorgo (TSU), em novilhos inteiros F1 Red Angus × Nelore, com oito meses de idade e 240 kg de peso vivo médio inicial, alimentados durante 172 dias (Tabela 15). O desempenho animal não foi influenciado pelos tratamentos com diferentes ingredientes energéticos da dieta (milho ou sorgo), uma vez que as variáveis peso vivo final (PVF), ganho de peso diário (GPD), área de olho e lombo (AOL), espessura de garupa subcutânea (EGS) e espessura de gordura na garupa (EGG) não apresentaram diferença ($p > 0,05$) entre os tratamentos.

Tabela 15. Parâmetros da carcaça e características de desempenho animal.

Parâmetros	TMU	TSU
Peso inicial (kg)	299,69	293,69
Ganho de peso diário (kg)	1,41	1,43
Peso final (kg)	482,54	486,81
Ganho de peso total (kg)	186,74	189,23
Espessura de gordura subcutânea inicial (mm)	1,92	2,02
Área de olho de lombo inicial (cm ²)	51,29	51,64
Espessura de gordura subcutânea final (mm)	4,28	4,16
Área de olho de lombo final (cm ²)	73,67	73,81
Espessura de gordura garupa final (mm)	5,87	5,38

Fonte: Igarasi et al. (2008)

Huck et al. (1999) também não verificaram diferença no desempenho e nas características de carcaça de novilhas alimentadas com silagem de grão úmido de sorgo a 35% de umidade e milho floculado, quando fornecidos em iguais proporções da dieta total (78% da MS total da dieta). Segundo esses autores, a umidade do grão entre 30 e 35% acarretou melhoria no processo fermentativo, com aumento na produção de ácido láctico, proporcionando redução mais acentuada no pH. Houve também aumento de 6% na eficiência de ganho de peso total, quando se elevou a umidade de 25% para 35% na ensilagem do grão de sorgo, por causa, principalmente, da maior disponibilidade do amido às enzimas amilolíticas. Passini et al.

(2003) encontraram valor de digestibilidade total da MS de 93,58 e 96,71%, respectivamente, para a silagem de grão úmido de milho e a silagem de grão úmido de sorgo.

Sorgo na Alimentação Humana

O interesse no uso do sorgo grão como alimento humano tem crescido em diversos países, em especial, pelos seguintes fatores: a) não possui glúten e, por isso, é totalmente seguro para o desenvolvimento de produtos para pessoas celíacas; b) possui sabor neutro, o que é uma grande vantagem na indústria de alimentos; c) apresenta menor custo de produção, vislumbrando a possibilidade de redução dos custos na indústria alimentícia; d) apresenta uma variedade de compostos bioativos, com elevada capacidade antioxidante e com potencial para utilização em produtos com apelo funcional. Resultados de pesquisas realizadas no Brasil mostraram elevada aceitação de produtos elaborados com farinha de sorgo, comprovando, dessa forma, grande potencial do cereal para uso na alimentação humana no País (Queiroz et al., 2015).

No Brasil, alguns trabalhos já vêm sendo conduzidos objetivando a introdução do sorgo na alimentação humana, especialmente em produtos sem glúten. Adicionalmente, genótipos de sorgo introduzidos ou desenvolvidos no País vêm sendo avaliados quanto aos teores de diversos compostos de interesse para a nutrição e a saúde humanas, com resultados bastante promissores (Moraes et al., 2012; Cardoso et al., 2014; Queiroz et al., 2015; Anunciação et al., 2019). Diante dos esforços para promover o consumo de grãos integrais, é crescente a conscientização entre os consumidores que reconhecem os benefícios das propriedades antioxidantes e evocam uma nova visão em direção aos efeitos benéficos desses compostos para a saúde.

Diversos tipos de alimentos são preparados utilizando-se o sorgo como ingrediente em várias regiões do globo. Na África, o sorgo é consumido após um processo de fermentação ou não, na forma de pães como o kiswa (Sudão), mingaus como o kogobe (continente africano), ogi (Nigéria) ou o to (África Ocidental), dentre outros tipos de alimentos (Abdelghafor et al., 2011; Jadhav; Annapure, 2013; Ratnavathi; Patil, 2013). Na Índia, uma das principais formas de consumo do sorgo é o roti, um tipo de pão achatado que não utiliza fermento em sua formulação, além do annam (sorgo cozido), sankati e kanji, mingaus grosso e fino, respectivamente. Entretanto, por causa, principalmente, da urbanização e da facilidade de acesso a outros

cereais refinados, o consumo do sorgo apresentou ligeiro declínio nesse país, mas, segundo Ratnavathi e Patil (2013), após ser atribuído ao sorgo o título de alimento saudável, observou-se um novo aumento de seu consumo na Índia.

Sorgo para Bioenergia

A previsão para o esgotamento das fontes de petróleo para o futuro próximo e o apelo global pela redução na emissão de CO² de origem fóssil têm feito com que o mundo, incluindo o Brasil, busque fontes alternativas de energia, que possam ser empregadas diretamente e de maneira sustentável na produção de energia. Dentre essas, o etanol assume importância particular, pois agrega as vantagens principais de poluir menos e possuir características físico-químicas semelhantes às da gasolina. A cana-de-açúcar, tradicionalmente empregada na produção de álcool, se desenvolve bem no trópico úmido, apresentando rendimentos altos em açúcares por área cultivada (Lipinski; Kresovich, 1982).

O sorgo sacarino se assemelha à cana-de-açúcar, uma vez que o armazenamento de açúcares se localiza nos colmos, além de fornecer bagaço em quantidade suficiente para a geração de vapor para a operação industrial. Além disso, o sorgo sacarino produz grãos que podem ser utilizados principalmente para alimentação animal na propriedade rural. Diferentemente da cana-de-açúcar, ele pode ser cultivado a partir de sementes e apresenta um ciclo vegetativo bem mais curto, de 120 a 130 dias.

Em microdestilarias, os seus colmos podem ser processados na mesma instalação destinada à produção de etanol de cana-de-açúcar, oferecendo também uma quantidade de resíduo fibroso (bagaço) para gerar o vapor necessário para a operação industrial. Resultados experimentais mostram que o sorgo sacarino pode ser uma cultura complementar à cana-de-açúcar para produção de etanol, podendo ser colhido na entressafra dela, assim reduzindo o período de ociosidade da indústria e favorecendo o corte da matéria-prima após maturação completa (Teixeira et al., 1997).

Hill et al. (2009) pesquisaram a eficiência do etanol derivado da fermentação de carboidratos e do etanol celulósico na redução de emissões de gases de efeito estufa, em relação às emissões pela gasolina. Segundo os autores, quando se considera o preparo do solo e o sistema de plantio (envolvendo a utilização de fertilizantes, corretivos e defensivos), o etanol não apresenta vantagem em relação à gasolina, na quantidade de

gás emitida. Portanto, os autores concluem que as vantagens potenciais dos biocombustíveis dependem de aumentar a eficiência dos sistemas de produção nos cultivos e nas biorrefinarias.

A versatilidade do sorgo se traduz em diversas maneiras diretas e indiretas de produção de energia, com elevada capacidade de produção de carboidratos, gás, óleo, eletricidade ou de combustão/aquecimento, e alta capacidade de transformação em energia limpa. Contudo, Monti e Venturi (2003) afirmam que o balanço positivo dessas transformações varia amplamente em função das cultivares, dos sistemas de produção e da oferta ambiental. Ainda segundo esses autores, a eficiência energética de sorgo sacarino é significativamente diferente da observada em cultivares com maior produção de fibras (lignocelulósicos) ou cultivares de sorgo sacarino. Assim, o estabelecimento de condições ótimas para a produção de sorgo envolve o reconhecimento e o manejo de diversos fatores.

A Embrapa Milho e Sorgo reiniciou seu programa de desenvolvimento de cultivares de sorgo sacarino em 2008, em razão do potencial desta cultura na geração de energia renovável e da grande demanda por matéria-prima alternativa para produção de biocombustíveis. Em 2012, foram lançadas três variedades, BRS 508, BRS 509 e BRS 511, que apresentavam maior potencial produtivo, com produtividade de biomassa de 50 t.ha⁻¹ e produção de etanol de 60 L.t⁻¹ biomassa, totalizando 3.000 L/ha de etanol. Numa segunda fase do programa, foram desenvolvidas linhagens de sorgo sacarino macho estéril (A) com caldo e alto teor de açúcar (ART > 12,5%), as quais são utilizadas como fêmeas no desenvolvimento de híbridos. Os primeiros resultados com híbridos desenvolvidos com estas linhagens mostraram produtividades de biomassa entre 70 e 80 t ha⁻¹ com produção de etanol de 60L t⁻¹ biomassa. Desta forma, os novos híbridos experimentais apresentaram potencial produtivo superior a 4.000 L ha⁻¹ de etanol (Almeida et al., 2019).

Outra forma de aumentar a produção de etanol é através da tecnologia de segunda geração de biocombustíveis, com a primeira usina iniciando as operações no Brasil em 2014. Neste caso, a matéria-prima (biomassa vegetal) precisa passar por hidrólises para tornar os açúcares fermentescíveis, com vista à produção de biocombustível. O sorgo biomassa é uma cultura com grande potencial nesta área, em razão da alta produtividade e qualidade da biomassa (baixo teor de lignina). O sorgo biomassa também pode ser utilizado para esta tecnologia por causa do seu grande potencial produtivo, chegando a produzir mais de 90 t ha⁻¹ de biomassa em um ciclo de até seis

meses.

Testes estão sendo feitos para o uso do sorgo biomassa como palhada, no sistema de plantio direto. O sorgo biomassa possui crescimento inicial mais rápido do que o granífero, atingindo produção de matéria seca maior e de melhor qualidade do que o milho, que é usado quando não é mais possível se plantar sorgo granífero (Borghi et al., 2020).

Referências

ABDELGHAFOR, R. F.; MUSTAFA, A. I.; IBRAHIM, A. M. H.; KRISHNAN, P. G. Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. **Advance Journal of Food Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 9-15, 2011.

ACOMPANHAMENTO da Safra Brasileira [de] Grãos: safra 2018/19: nono levantamento. Brasília, DF: Conab, 2019. 113 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos>. Acesso em: 12 mar. 2020.

ALMEIDA JÚNIOR, G. A.; COSTA, C.; CARVALHO, S. M. R.; PERSICHETTI JÚNIOR, P.; PANICHI, A. Desempenho de bezerros holandeses alimentados após o desaleitamento com silagem de grãos úmidos ou grãos secos de milho ou sorgo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 1, p. 148-156, 2008.

ALMEIDA, E. F.; MOTA, J. H.; MENEZES, C. B.; YURI, J. E.; RESENDE, G. M. Desempenho agrônômico de híbridos de sorgo granífero na safrinha em Jataí-GO. **Scientia Plena**, v. 11, n. 12, p. 1-7, 2015.

ALMEIDA, L. G. F. de; PARRELLA, R. A. da C.; SIMEONE, M. L. F.; RIBEIRO, P. C. de O.; BARBOSA, G. M. P.; BRITO, P. L.; COSTA, A. S. V. da; SANTOS, A. S. dos Characterization of cell wall polysaccharides and cellulosic ethanol potential in genotypes of sorghum biomass. **International Journal of Development Research**, v. 9, n. 4, p. 26810-26820, 2019.

AMBRÓSIO, A. **Uso de sorgo grão inteiro e moído sobre o desempenho, digestibilidade e morfometria das vísceras de perus**. 2014. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

AMBRÓSIO, A.; FERNANDES, E. A.; REGINATTO, M. F.; LITZ, F. H.; CARVALHO, C. M. C.; FAGUNDES, N. S.; BARBOSA, L. A. J. Sorgo grão inteiro ou moído em substituição ao milho sob o desempenho de perus aos 28 dias de idade. In: CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLAS, 30., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: FACTA, 2013.

ANDRADE, J. B.; FERRARI JÚNIOR., E.; BRAUN, G. Valor nutritivo da silagem de cana-de-açúcar tratada com ureia e acrescida de rolão de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1169-1174, 2001.

ANTUNES, R. C.; RODRIGUES, N. M.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; PEREIRA, L. G. R.; FONTES, D. O.; BORGES, I.; BORGES, A. L. C. C.; SALIBA, E. O. S. Valor nutritivo de grãos de sorgo com diferentes texturas do endosperma para leitões. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 60, n. 3, p. 713-718, 2008.

ANUNCIÇÃO, P. C.; CARDOSO, L. de M.; ALFENAS, R. de C. G.; QUEIROZ, V. A. V.; CARVALHO, C. W. P. de; MARTINO, H. S. D.; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M. Extruded sorghum consumption associated with a caloric restricted diet reduces body fat in over weight men: a randomized controlled trial. **Food Research International**, v. 110, p. 693-700, 2019.

ARROYO, J.; AUVERGNE, A.; DUBOIS, J. P.; LAVIGNE, F.; BIJJA, M.; FORTUNLAMOTHE, L. Influence of amount and form of sorghum in the diet on the performance of overfed geese. **The Journal of Applied Poultry Research**, v. 22, n. 4, p. 849-854, 2013a.

ARROYO, J.; AUVERGNE, A.; DUBOIS, J. P.; LAVIGNE, F.; BIJJA, M.; BANNELIER, C.; MANSE, H.; FORTUN-LAMOTHE, L. Effects of substituting yellow corn for sorghum in geese diets on magret and foie grass quality. **Poultry Science**, v. 92, n. 9, p. 2448-2456, 2013b.

ASSUENA, V.; VILARDI, R. S.; JUNQUEIRA, O. M.; CASARTELLI, E. M.; LAURENTIZ, A. C.; DUARTE, K. F. Substituição do milho pelo sorgo em rações para poedeiras comerciais formuladas com diferentes critérios de atendimento das exigências em aminoácidos. **Ciência Animal Brasileira**, v. 9, n. 1, p. 93-99, 2008.

BALOGUN, R. O.; ROWE, J. B.; BIRD, S. H. Fermentability and degradability of sorghum grain following soaking, aerobic or anaerobic treatment. **Animal Feed Science Technology**, v. 120, n. 1/2, p. 141-150, 2005.

BENZ, J. M.; LINNEEN, S. K.; TOKACH, M. D.; DRITZ, S. S.; NELSSSEN, J. L.; DEROUCHAY, J. M.; GOODBAND, R. D.; SULABO, R. C.; PRUSA, K. J. Effects of dried distillers grains with solubles on carcass fat quality of finishing pigs. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 11, p. 3666-3682, 2010.

BEZERRA, E. S.; TIESENHAUSEN, I. E. V. von; OLIVEIRA, A. I. G. et al. Valor nutricional das silagens de milho, milho consorciado com sorgo e rebrotas de sorgo. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v. 22, p. 1044-1054, 1993.

BIAGI, J. D. Implicações da granulometria de ingredientes na qualidade de peletes e na economia da produção de rações. In: SIMPÓSIO SOBRE GRANULOMETRIA DE INGREDIENTES E RAÇÕES PARA SUÍNOS E AVES, 1998, Concórdia-SC. **Anais... Concórdia: Embrapa-CNPISA**, 1998. p. 57-70.

BORGHI, E.; SILVA, G. F. da; CALONEGO, J. C.; PARRELLA, R. A. da C.; ANTONIO, M. S. **Sorgo biomassa BRS 716 para produção de forragem e palha em sistema de plantio direto e preparo convencional com soja**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 216).

BRAUN, R. O.; PATTACINI, S. H.; SCOLES, G. E.; CERVELLINI, J. E. Productividad y calidad de grasa corporal en cerdos alimentados con cereales crudos y extruidos. **Archivos de Zootecnia**, v. 56, n. 215, p. 299-308, 2007.

BROWN, M. S.; KREHBIEL, C. R.; DUFF, G. C.; GALYEAN, M. L.; HALLFORD, D. M.; WALKER, D. A. Effect of degree of corn processing on urinary nitrogen composition, sérum metabolite and insulin profiles, and performance by finishing steers. **Journal of Animal Science**, v. 78, p. 2646-2474, 2000.

CARDOSO, L. M.; MONTINI, T. A.; PINHEIRO, S. S.; QUEIROZ, V. A. V.; PINHEIRO SANT'ANA, H. M.; MARTINO, H. S. D.; MOREIRA, A. V. B. Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Food Chemistry**, v. 152, p. 201-217, 2014.

CARVALHO, L. S. S.; FAGUNDES, N. S.; LITZ, F. H.; SAAR, A. G. L.; FERNANDES, E. A. Sorgo grão inteiro ou moído em substituição ao milho em rações de frangos de corte. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1757-1765, 2015.

CHEN, K. H.; HUBER, J. T.; THEURER C. B.; SWINGLE, R. S.; SIMAS, J.; CHAN, S. C.; WU, Z.; SULLIVAN, J. L. Effect of steamflaking corn and sorghum grains on performance of lactating cows. **Journal of Dairy Science**, v. 77, n. 4, p. 1038-1043, 1994.

CLARINDO, R. L.; SANTOS, F. A. P.; BITTAR, C. M. M.; IMAIZUMI, H.; LIMA, N. V. A.; PEREIRA, E. M. Avaliação de fontes energéticas e proteicas na dieta bovinos confinados em fase de terminação. **Ciência Animal Brasileira**, v. 9, n. 4, p. 902-910, 2008.

CORREDOR, D. Y.; BEAN, S. S.; SCHOBBER, T.; WANG, D. Effect of decorticating sorghum on ethanol production and composition of DDGS. **Cereal Chemistry**, v. 83, n. 1, p. 17-21, 2006.

COSTA, C.; ARRIGONI, M. B.; SILVEIRA, A. C. Conservação de grãos úmidos de cereais para alimentação animal. In: CONFERÊNCIA VIRTUAL GLOBAL SOBRE PRODUÇÃO ORGÂNICA DE BOVINOS DE CORTE, 1., 2002, Corumbá. **Anais...** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002. Disponível em: <<https://www.cpap.embrapa.br/agencia/congressovirtual/pdf/portugues/03pt06.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

DANIEL, J. L. P.; ZOPOLLATO, M.; NUSSIO, L. G. A escolha do volumoso suplementar na dieta de ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 261-269, 2011.

DELGADO-ELORDUY, A.; THEURER, C. B.; HUBER, J. T.; ALIO, A.; LOZANO, O.; SADIK, M.; CUNEO, P.; DE YOUNG, D.; SIMAS, J.; SANTOS, J. E. P.; NUSSIO, L.; NUSSIO, C.; WEBB JR., K. E.; TAGARI, H. Splanchnic and mammary nitrogen metabolism by dairy cows fed dry-rolled or steam-flaked sorghum grain. **Journal of Dairy Science**, v. 85, p. 148-159, 2002a.

DELGADO-ELORDUY, A.; THEURER, C. B.; HUBER, J. T.; ALIO, A.; LOZANO, O.; SADIK, M.; CUNEO, P.; DE YOUNG, D.; SIMAS, J.; SANTOS, J. E. P.; NUSSIO, L.; NUSSIO, C.; WEBB JR., K. E.; TAGARI, H. Splanchnic and mammary nitrogen metabolism by dairy cows fed steam-rolled or steam-flaked corn. **Journal of Dairy Science**, v. 85, p. 160-168, 2002b.

DIAS, A. M. A.; BATISTA, Â. M. V.; FERREIRA, M. de A.; LIRA, M. de A.; SAMPAIO, I. B. M. Efeito do estágio vegetativo do sorgo (*Sorghum bicolor*, (L.) moench) sobre a composição química da silagem, consumo, produção e teor de gordura do leite para vacas em lactação, em comparação à silagem de milho (*Zea mays* (L.)). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 6, p. 2086-2092, 2001.

DINIZ, F. V.; FERNANDES, E. A.; MUNDIN, S. A. P.; ALVES, M. B. R.; AQUINO, C. A. M.; CHIARELI, D. Desempenho de frangos de corte submetidos a dietas formuladas a base de milho e sorgo. In: CONFERÊNCIA APINCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AVÍCOLA, 4., 2002, Campinas. **Anais**. Campinas: [s.n.], 2002. p. 60.

DOZIER, W. A. Reducing utility cost in the feed mill. **Watt Poultry**, v. 53, p. 40-44, 2002.

DWEIKAT, I. Sorghum. In: KOLE, C.; JOSHI, C. P.; SHONNARD, D. R. (ed.). **Handbook of bioenergy crop plants**. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 483-501.

ETUK, E. B.; UKAEJIOFO, U. R. Tannin content and dietary effects of brown coat coloured sorghum on the performance of young local turkey. **Animal Production Research Advances**, v. 3, n. 2, p. 86-90, 2007.

EVANGELISTA, A. R.; LIMA, J. A. **Silagens: do cultivo ao silo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. 210 p.

FEOLI, C. **Use of corn- and sorghum-based distillers dried grains with solubles in diets for nursery and finishing pigs**. 2008. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Kansas State University Manhattan, Kansas, 2008.

FERNANDES, L. O.; PAES, J. M. V.; REIS, R. A.; SILVA, E. A.; SOUZA, J. A. Cultivares de milho e sorgo para a produção de silagem: safra 2003/2004. **FAZU em Revista**, n. 6, p. 83-86, 2009.

FERNANDES, E. A.; CARVALHO, C. M. C.; LITZ, F. H.; MARTINS, J. M. S.; SILVEIRA, M. M.; SILVA, M. C. A.; BARBERO, L. M. Viabilidades técnica e econômica da utilização de grãos de sorgo para monogástricos. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 278, p. 22-32, 2014a.

FERNANDES, E. A.; LITZ, F. H.; CARVALHO, C. M. C.; SILVEIRA, M. M.; SILVA, M. C. A. Perspectivas da demanda de grãos de sorgo para alimentação animal. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014b. p. 1-14.

FERNANDES, E. A.; PEREIRA, W. J. S.; HACKENHAAR, L.; RODRIGUES, R. M.; TERRA, R. The use of whole grain sorghum in broiler feeds, **Brazilian Journal of Poultry Science**, v. 15, n. 3, p. 217-222, 2013.

FREITAS, G. A. R. **Consumo e digestibilidade aparente das silagens de cinco genótipos de milho (*Zea mays* L.)**. 2002. 50 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

FIALHO, E. T.; LIMA, J. A. F.; OLIVEIRA, V.; SILVA, H. O. Substituição do milho pelo sorgo sem tanino em rações de leitões: digestibilidade dos nutrientes e desempenho animal. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, n. 1, p. 105-111, 2002.

FAO. **FAOSTAT Production crops**. Roma, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 18 mar. 2020.

GARCIA, R. G.; MENDES, A. A.; ALMEIDA PAZ, I. C. L.; KOMIYAMA, C. M.; CALDARA, F. R.; NAA, I. A.; MARIANO, W. S. Implications of the use of sorghum in broiler production. **Brazilian Journal of Poultry Science**, v. 15, p. 257- 262, 2013.

GARCIA, R. G.; MENDES, A. A.; COSTA, C.; PAZ, I. C. L. A.; TAKAHASHI, S. E.; PELÍCIA, K. P.; KOMIYAMA, C. M.; QUINTEIRO, R. R. Desempenho e qualidade da carne de frangos de corte alimentados com diferentes níveis de sorgo em substituição ao milho. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 57, n. 5, p. 634-643, 2005.

GOBESSO, A. A. O.; D'AURIA, E.; PREZOTTO, L. D.; RENNO, F. P. Substituição de milho por sorgo triturado ou extrusado em dietas para equinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 11, p. 2011-2016, 2008.

GOMIDE, J. A.; ZAGO, C. P.; CRUZ, M. E.; EVANGELISTA, A. R.; GARCIA, R.; OBEID, J. A. Milho e sorgo em cultivos puros ou consorciados com soja, para produção de silagens. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v. 16, p. 308-317, 1987.

HARBORTH, K. W.; MARSTON, T. T.; LLEWELLYN, D. A. **Comparison of corn and grain sorghum dried distillers grains and protein supplements for growing beef heifers**. Manhattan: Kansas State University, 2006. Report of Progress 959. Disponível em: <https://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/4372/cattle06pg3-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 nov. 2020.

HERRERA, R.; PÉREZ, A.; ARECE, J. Utilization of sorghum grain and forage from ligneous plants in pig fattening. **Pastos y Forrajes**, v. 36, n. 1, p. 64-71, 2013.

HILL, J.; POLASKY, S.; NELSON, E.; TILMAN, D.; HUO, H.; LUDWIG, L.; NEUMANN, J.; ZHENG, H.; BONTA, D. Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. **Proceedings of the Nacional Academy of Sciences of the United of the States of America**, v. 106, n. 6, p. 2077-2082, 2009.

HUCK, G. L.; KREIKEMEIER, K. K.; BOLSEN, K. K. Effects of reconstituting field dried and early harvested sorghum grain on the ensiling characteristics of the grain and growth performance and carcass merit of feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 77, p. 1074-1081, 1999.

IGARASI, M. S.; ARRIGONI, M. B.; SOUZA, A. A.; SILVEIRA, A. C.; MARTINS, C. L.; OLIVEIRA, H. N. Desempenho de bovinos jovens alimentados com dietas contendo grão úmido de milho ou sorgo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 3, p. 513-519, 2008.

JACELA, J. Y.; FROBOSE, H. L.; DeROUCHEY, J. M.; TOKACH, M. D.; DRITZ, S. S.; GOODBAND, R. D.; NELSSSEN, J. L. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. **Journal of Animal Science**, v. 88, n. 11, p. 3617-3623, 2010.

JADHAV, M. V.; ANNAPURE, U. S. Effect of extrusion process parameters and particle size of sorghum flour on expanded snacks prepared using different varieties of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 3, p. 71-85, 2013.

JOBIM, C. C.; BRANCO, A. B.; SANTOS, G. T. Silagem de grãos úmidos na alimentação de bovinos leiteiros. In: SIMPÓSIO GOIANO SOBRE MANEJO E NUTRIÇÃO DE BOVINOS DE CORTE E LEITE, 5., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBNA, 2003. p. 357-376.

JORDAN, K. E.; NEMECHEK, J.; GONCALVES, M. A.; GOODBAND, R. D.; TOKACH, M. D.; DRITZ, S. S.; DEROUCHY, J. M.; WOODWORTH, J. C. Effects of increasing crystalline amino acids in sorghum- or maize-based diets on nursery pig growth performance. **Journal of Animal Science**, v. 93, p. 269, 2015. Suppl. 2.

KUBECKA, B. **Sorghum plays role in ethanol's impact**. 2011. Disponível em: <<http://www.ethanolproducer.com/articles/7408/sorghum-plays-role-in-ethanolundefineds-impact>>. Acesso em: 11 mar. 2016.

LANDAU, E. C.; NETTO, D. A. M. **Expansão potencial da produção de sorgo granífero no Brasil no sistema de rotação com soja considerando o zoneamento de risco climático 2015/16**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 27 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 125).

LIPINSKI, E. S.; KRESOVICH, S. Sugar crops as a solar energy converters. **Experientia**, v. 38, p. 13-17, 1982.

LITZ, F. H.; FERNANDES, E. A.; ANTUNES, R. C.; GIRÃO, L. V. C.; FERREIRA, A. M. S.; LIMÃO, V. A.; BUENO, J. P. R. Parâmetros zootécnicos e desenvolvimento da moela de frangos de corte em dietas de sorgo grão e a inclusão de carotenoides. **Arquivo Brasileira de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, n. 2, p. 607-614, 2020.

LODGE, S. L.; KLOPFENSTEIN, T. J.; SHAIN, D. H.; HEROLD, D. W. Evaluation of corn and distillers byproducts. **Journal of Animal Sciences**, v. 75, p. 37-43, 1997.

LUSK, J. W.; KARAU, P. K.; BALOGU, D. O.; GOURLEY, L. M. Brown mibrid sorghum or corn silage for milk production. **Journal Dairy Science**, v. 67, n. 8, p. 1739-1744, 1984.

McCUISTION, K. C.; SELLE, P. H.; LIU, S. Y.; GOODBAND, R. D. Sorghum as a feed grain for animal production. In: TAYLOR, J. R. N.; DUODU, K. G. (ed.). **Sorghum and millets: chemistry, technology, and nutritional attributes**. 2^oed. Washington: AACCC International Press, 2019. p. 355-391.

MELLO, R. Silagem de milho, sorgo e gramíneas tropicais. **Revista Eletrônica Nutritime**, v. 1, n. 1, p. 48-58, 2004.

MENEZES, C. B. de. A opção interessante do sorgo. **A Granja**, v. 76, n. 856, p. 35-36. 2020.

MENEZES, C. B. de; COELHO, A. M.; SILVA, A. F. da; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; RODRIGUES, J. A. S. É possível aumentar a produtividade de sorgo granífero no Brasil? In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 32., 2018, Lavras. **Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil**: livro de palestras. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2018. p. 106-139.

MENEZES, C. B. de; SILVA, A. F. da; TARDIN, F. D. Sorgo safrinha. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 293-308. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

MITZNER, K. C.; OWEN, F. G.; GRANT, R. J. Comparison of sorghum and corn grains in early and midlactation diets for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 77, p. 1044-1051, 1994.

MONTI, A.; VENTURI, G. Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in northern Italy. **European Journal of Agronomy**, v. 19, p. 35-43, 2003.

MORAES, E. A.; NATAL, D. I. G.; QUEIROZ, V. A. V.; SCHAFFERT, R. E.; CECON, P. R.; DE PAULA, S. O.; BENJAMIM, L. D. A., RIBEIRO, S. M. R.; MARTINO, H. S. D. Sorghum genotype may reduce low-grade inflammatory response and oxidative stress and maintains jejunal morphology of rats fed a hyperlipidic diet. **Food Research International**, v. 49, p. 553-559, 2012.

MOREAU, R. A.; NGHIEM, N. P.; ROSENTRATER, K. A.; JOHNSTON, D. B.; HICKS, K. B. Ethanol production from starch-rich crops other than corn and the composition and value of the resulting DDGS. In: LIU, K.; ROSENTRATER, K. A. (ed.). **Distillers grains**: production, properties, and utilization. Urbana: AOCS Publishing, 2012. p. 103-117.

MOURA, A. M. A.; FONSECA, J. B.; RABELLO, C. B. V.; TAKATA, F. N.; OLIVEIRA, N. T. E. de. Desempenho e qualidade do ovo de codornas japonesas alimentadas com rações contendo sorgo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 12, p. 2697-2702, 2010.

MUCK, R. E. Potential of energy production from conserved forages. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FORAGE QUALITY AND CONSERVATION, 2., 2011, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2011. p. 1-22.

MURTA, G. P. O.; FERNANDES, E. A.; OLEGÁRIO, M. M. M.; SILVA, C. B.; PEREIRA, P. C. Efeito da moagem do sorgo grão sobre o desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, p. 32, 2004. Suplemento 6.

NEUMANN, M.; MÜHLBACH, P. R. F.; NÖRNBERG, J. L.; OST, P. R.; RESTLE, J.; SANDINI, I. E.; ROMANO, M. A. Características da fermentação da silagem obtida em diferentes tipos de silos sob efeito do tamanho de partículas e da altura da colheita das plantas de milho. **Ciência Rural**, v. 37, n. 3, p. 847-854, 2007.

NICHOLS, N. N.; BOTHAST, R. J. Production of ethanol from grain. In: VERMERRIS, W. (ed.). **Genetic improvement of bioenergy crops**. New York: Springer, 2008. p. 75-88.

NICHOLS, S. W.; FROETSCHER, M. A.; AMOS, H. E.; ELY, L. O. Effects of fiber from tropical corn and forage sorghum silages on intake, digestion, and performance of lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 81, n. 9, p. 2383-2393, 1998.

NIKKHAH, A.; ALIHHANI, M.; AMANLOU, H. Effects of feeding ground or steam-flaked broom sorghum and ground barley on performance of dairy cows in midlactation. **Journal of Dairy Science**, v. 87, n. 1, p. 122-130, 2004.

NUMMER FILHO, I. Silagem de grão úmido. **Pork World**, v. 1, n. 2, p. 38-42, 2001.

NUSSIO, L. G.; CAMPOS, F. P.; PAZIANI, S. de F.; SANTOS, F. A. P.; CAMPOS, F. P. de. Volumosos suplementares: estratégias de decisão e utilização. In: EVANGELISTA, A. R.; SILVEIRA, P. J.; ABREU, J. G. (ed.). **Forragicultura e pastagens: temas em evidência**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. p. 193-232.

OWENS, F. N.; SECRIST, D. S.; HILL, W. J.; GILL, D. R. The effect of grain source and grain processing on performance of feedlot cattle: a review. **Journal of Animal Science**, v. 75, p. 868-879, 1997.

OWENS, F. N.; ZINN, R. Corn grain for cattle: influence of processing on site and extent of digestion. In: SOUTHWEST NUTRITION CONFERENCE, 2005, El Centro, CA. **Proceedings...** El Centro: University of California, 2005, p. 86-112.

PASSINI, R.; RODRIGUES, P. H. M.; CASTRO, A. L.; SILVEIRA, A. C. Parâmetros de fermentação ruminal em bovinos alimentados com grãos de milho ou sorgo de alta umidade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 5, p. 1266-1274, 2003.

PEIXOTO, L. A. O.; ALVES FILHO, D. C.; RESTLE, J. Grão seco ou silagem de grão úmido de sorgo como fonte energética para bezerras. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 40., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Zootecnia, [2003].

PEREIRA, D. H.; PEREIRA, O. G.; VALADARES FILHO, S. C.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, A. P.; MARTINS, F. H.; VIANA, V. Consumo, digestibilidade dos nutrientes e desempenho de bovinos de corte recebendo silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e diferentes proporções de concentrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 282-291, 2006.

PIRES, D. A. A. **Consumo e digestibilidade aparente em ovinos de silagens de sorgo com e sem taninos nos grãos**. 2003, 53f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

QUEIROZ, V. A. V.; MENEZES, C. B. de; BARROS, F. A. R. de; MARTINO, H. S. D. O sorgo na alimentação humana. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 247-266. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

RATNAVATHI, C.; PATIL, J. Sorghum utilization as food. **Journal of Nutrition and Food Science**, v. 4, n. 1, article 1000247, 2013.

REIS, V. E. A. **Desempenho produtivo e qualidade dos ovos de poedeiras comerciais semipesadas alimentadas com sorgo**. 2004. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

RESENDE, A. V.; COELHO, A. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. C. **Adubação maximiza o potencial produtivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 119).

RODRIGUES, P. B.; FREITAS, R. T. F.; FIALHO, T. E.; SILVA, H. O.; GONÇALVES, T. M. Digestibilidade dos nutrientes e desempenho de suínos em crescimento e terminação alimentados com rações à base de milho e sorgo suplementadas com enzimas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, n. 2, p. 91-100, 2002.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T.; HANNAS, M. I.; DONZELE, J. L.; SAKOMURA, N. K.; PERAZZO, F. G.; SARAIVA, A.; TEIXEIRA, M. L.; RODRIGUES, P. B.; OLIVEIRA, R. F.; BARRETO, S. L. T.; BRITO, C. O. **Tabelas brasileiras para aves e suínos**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2017. 252 p.

SANTOS, F. A. P.; HUBER, J. T.; THEURER, C. B.; SWINGLE, R. S.; SIMAS, J. M.; CHEN, K. H.; YU, P. Milk yield and composition of lactating cows fed steam-flaked sorghum and graded levels of ruminally degradable protein. **Journal of Dairy Science**, v. 81, n. 1, p. 215-220, 1998.

SANTOS, J. E. P.; HUBER, J. T.; THEURER, C. B.; NUSSIO, L. G.; TARAZON, M.; SANTOS, F. A. Response of lactating dairy cows to steam-flaked sorghum, steam-flaked corn or steam-rolled corn and protein sources of differing degradability. **Journal of Dairy Science**, v. 82, n. 4, p. 728-737, 1999.

SANTOS, J. E. P.; HUBER, J. T.; THEURER, C. B.; NUSSIO, C. B.; NUSSIO, L. G.; TARAZON, M.; FISH, D. Effects of grain processing and bovine somatotropin on metabolism and ovarian activity of dairy cows during early lactation. **Journal of Dairy Science**, v. 83, n. 5, p. 1004-1015, 2000.

SANTOS, F. A. P.; PEREIRA, E. M.; PEDROSO, A. M. Suplementação energética de bovinos de corte em confinamento. In: SIMPÓSIO SOBRE BOVINOCULTURA DE CORTE: PECUÁRIA DE CORTE INTENSIVA NOS TRÓPICOS, 5., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2004.

SHAPOURI, H.; SALASSI, M. **The economics feasibility of ethanol production from sugar in the United States**. Washington: USDA-ERS, 2006. 69 p. Disponível em: <https://www.fsa.usda.gov/Internet/FSA_File/ethanol_fromsugar_july06.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

SCHEUERMANN, N. G. **Utilização do sorgo em rações para frangos de corte**. Concórdia: Embrapa-CNPISA, 1998. 3 p. (Embrapa-CNPISA. Instrução Técnica para o Avicultor, 9).

SILVA M. C. A.; CAROLINO, A. C. X. G.; LITZ, F. H.; FAGUNDES, N. S.; FERNANDES, E. A.; MENDONÇA, G. A. Effects of sorghum on broilers gastrointestinal tract. **Brazilian Journal of Poultry Science**, v. 17, n. 1, p. 95-102, 2015.

SILVA, M. C. A.; CAROLINO, A. C. X. G.; LITZ, F. H.; FAGUNDES, N. S.; FERNANDES, E. A. Sorgo grão inteiro na ração preinicial de pintinhos de corte e os efeitos sobre o desenvolvimento corporal e do tubo gastrintestinal. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 2769-2782, 2014.

SILVEIRA, M. M. **Estudo de programas nutricionais alternativos na dieta de frangos de corte com o uso do grão inteiro de sorgo**. 2014. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SOTAK, K. M.; GOODBAND, M. D.; TOKACH, S. S.; DRITZ, S. S.; DEROUCHÉY, J. M.; NELSSÉN, J. L. The effects of corn or sorghum based diets with or without sorghum dried distillers grains with solubles on lactating-sow and litter performance. **The Professional Animal Scientist**, v. 31, n. 3, p. 185-190, 2015.

STEIN, H. H.; LAGOS, L. V.; CASAS, G. A. Nutritional value of feed ingredients of plant origin fed to pigs. **Animal Feed Science and Technology**, v. 218, p. 33-69, 2016.

TEIXEIRA, C. G.; JARDINE, J. G.; BEISMAN, D. A. Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em microdestilaria. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 17, n. 3, p. 221-229, 1997.

THEURER, C. B.; LOZANO, O.; ALIO, A.; DELGADOELORDUY, A.; SADIK, M.; HUBER, J. T.; ZINN, R. A. Steam-processed corn and sorghum grain flaked at different densities alter ruminal, small intestinal, and total tract digestibility of starch by steers. **Journal of Animal Science**, v. 77, n. 10, p. 2824-2831, 1999.

TOMIC, T. R.; PEREIRA, L. G. R.; GONÇALVES, L. C.; BORGES, I. **Características químicas para avaliação do processo fermentativo de silagens: uma proposta para qualificação da fermentação**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2003. 20 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 57).

VALADARES FILHO, S. C.; MAGALHÃES, K. A.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; CAPELLE, E. R. (ed.). **Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos**. 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 239 p.

WEBER, I. F.; FEDDERN, V.; VIEIRA, O. F. V.; VIEIRA, J. C.; LIMA, G. J. M. M. Ocorrência de micotoxinas em farelos de soja, trigo e sorgo no Brasil nos anos de 2016 e 2017. In: SIMPÓSIO DE SEGURANÇA ALIMENTAR, 6., 2018, Gramado. **Desvendando mitos: anais**. Porto Alegre: UFRGS; Campinas: SBCTA, 2018.

ZAGO, C. P. Cultura do sorgo para produção de silagem de alto valor nutritivo. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 4., 1991, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1991.

ZAGO, C. P. Silagem de sorgo de alto valor nutritivo. In: CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S.; FERREIRA, J. J. **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. p. 519-544.

ZINN, R. A.; OWENS, F. N.; WARE, R. A. Flaking corn: processing mechanics, quality standards, and impacts on energy availability and performance of feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 80, n. 5, p. 1145-1156, 2002.

Capítulo 2

Origem, evolução e domesticação do sorgo

*Carlos Juliano Brant Albuquerque
Cícero Beserra de Menezes
Rogério Soares de Freitas*

Origem

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L). Moench) está entre os principais cereais do globo, sendo alimento básico para milhares de pessoas principalmente na África e Ásia. O consumo desse cereal pela população, especialmente a africana, chega a quase 75% do total dos grãos produzidos em alguns países como Sudão e Nigéria. Na Ásia, os principais países consumidores de sorgo são a China e a Índia, que respondem por quase 90% do total (Queiroz et al., 2009). No Brasil, o sorgo é usado principalmente como ração animal, mas está se tornando popular para uso como forrageira e em produtos alimentícios por causa da demanda por grãos especiais, para fabricação de produtos sem glúten. Além disso, em anos recentes, o uso dessa planta na produção de bioenergia tem sido objeto de pesquisas por parte dos setores público e privado.

Relatos arqueológicos mostraram presença dessa planta há aproximadamente 5.000 anos no nordeste da África e há 8.000 anos no sudoeste na Ásia, mais precisamente no Egito (Wendorf et al., 1992; Mann et al., 1983; Winchell et al., 2018; Smith et al., 2019).

Existe grande diversidade do sorgo cultivado e do sorgo selvagem na África Central (Smith et al., 2019). A maior diversidade da espécie nesse continente foi gerada através da seleção disruptiva (seleção de tipos melhorados e não melhorados pelo homem), isolamento e recombinação em habitats extremamente variados, tendo como resultados populações diferentes. Assim, o continente africano é considerado o principal centro de origem do sorgo (Doggett, 1988). As populações polimórficas possibilitaram, através dos anos, novas formas que deram origem aos tipos de sorgos

cultivados atualmente.

No subcontinente indiano, evidências desse cereal foram descobertas em um sítio arqueológico na parte ocidental de Rojdi (Saurashtra), datando de cerca de 4.500 anos atrás (Damania, 2002). O subcontinente indiano é considerado o centro secundário de origem do sorgo (Vavilov, 1992).

O sorgo foi descrito pela primeira vez por Linnaeus em 1753 sob o nome *Holcus*. Em 1794, Moench distinguiu o gênero *Sorghum* do gênero *Holcus* (Celarier, 1959; Clayton, 1987). Posteriormente, vários autores discutiram a sistemática, origem e evolução do sorgo desde Linnaeus, possibilitando uma excelente visão da classificação atual para descrever a variação encontrada nos sorgos cultivados.

O sorgo pertence a família Poaceae, tribo Andropogoneae, subtribo Sorghinae e gênero *Sorghum* Moench (Clayton; Renvoize, 1986). O gênero sorgo possui 25 espécies que estão taxonomicamente em cinco subgêneros: *Eusorghum*, *Chaetosorghum*, *Heterosorghum*, *Parasorghum* e *Stiposorghum*. Importante destacar que os quatro últimos são silvestres.

O *Eusorghum* inclui tipos silvestres (*S. bicolor* spp. *arundinaceum* e o *S. halepense*) e cultivados (*S. bicolor* spp. *bicolor*). As espécies selvagens consideradas invasoras em lavouras comerciais (falso-massambará ou capim-selvagem, além do capim-massambará) e capim-sudão usado como forrageira são exemplos. Os sorgos cultivados (*S. bicolor* spp. *bicolor*) são representados por vários tipos agronômicos, como o sorgo granífero, forrageiro, biomassa, vassoura e sacarino.

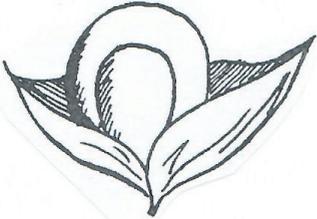
A espécie *Sorghum bicolor* foi amplamente distribuída pela África, costa da Índia, Indonésia e depois para a China (De Wet, 1978). Essa dispersão surgiu no leste da África a partir da subespécie *aethiopicum*, gerando grande diversidade na Ásia. No entanto, acredita-se que o primeiro *bicolor* tenha surgido da subespécie *verticilliflorum* na África central, onde, por meio do fluxo gênico com outras formas selvagens, originaram as raças *caudatum*, *kafir*, *guinea* e *durra* (Brown et al., 2011). Em razão da grande variabilidade genética dessas espécies, na Tabela 1 são descritas as 5 raças básicas e 10 híbridas existentes, e na Tabela 2 são mostradas as raças de sorgo selvagem, além da possível origem delas.

Tabela 1. Raças de sorgo cultivadas (básicas e híbridas), características dos grãos, espiguetas e possível centro de origem.

Grupo Genético Primário (2n =20) - Raças de <i>S. bicolor</i> spp. <i>bicolor</i> (L.) Moench		
Raças básicas	Características dos grãos	Origem
<p>1) bicolor (B)</p> 	<p>Grãos alongados, levemente ovalados e dorso ventralmente simétricos. As glumas que seguram o grão podem ser completamente cobertas ou expostas a cerca de um quarto do seu comprimento</p>	<p>Disseminada na África</p>
<p>2) caudatum (C)</p> 	<p>Grãos são marcadamente assimétricos. O lado próximo à gluma inferior é plano, ou até um tanto côncavo, com o lado oposto sendo arredondado e abaulado. As glumas têm tamanho menor ou até metade do comprimento do grão</p>	<p>Nigéria, Chad, Sudão, Uganda</p>

Continua...

Tabela 1. Continuação

Grupo Genético Primário ($2n = 20$) - Raças de <i>S. bicolor</i> spp. <i>bicolor</i> (L.) Moench		
Raças básicas	Características dos grãos	Origem
3) durra (D) 	Os grãos são arredondados, abaulados, em forma de cunha e ligeiramente mais largos na base. As glumas são largas com textura diferente na ponta e base, tendo um vinco transversal no meio	Etiópia, Índia
4) guinea (G) 	Grãos achatados dorsoventralmente, de contorno sublenticular. Na maturidade, as glumas apresentam abertura de 90° involutas podendo ser mais longas que o grão	Tanzânia, Malawi
5) kafir (K) 	Os grãos são simétricos e mais ou menos esféricos. As glumas são aderentes e de comprimento variável	Da Tanzânia à África do Sul e Angola

Continua...

Tabela 1. Continuação

Grupo Genético Primário (2n =20) - Raças de <i>S. bicolor</i> spp. <i>bicolor</i> (L.) Moench		
Raças básicas	Características dos grãos	Origem
Raças Híbridas (Combinações)	Origem	
1) guinea – bicolor (GB)	África ocidental.	
2) caudatum – bicolor (CB)	Nigéria, Chad, Sudão, Uganda, China	
3) kafir – bicolor (KB)	Da Tanzânia à África do Sul	
4) durra – bicolor (DB)	Regiões elevadas da Etiópia	
5) guinea – caudatum (GC)	Nigéria, Chad, Sudão, Etiópia	
6) guinea – kafir (GK)	Tanzânia, Malawi, Índia	
7) guinea – durra (GD)	De Senegal a Etiópia	
8) kafir – caudatum (KC)	Sorgos híbridos nos Estados Unidos	
9) durra – caudatum (DC)	Nigéria, Chad, Sudão	
10) kafir – durra (KD)	Produção Experimental	

Fonte: Harlan e De Wet (1972), Arnold (1983), International Board for Plant Genetic Resources, (1993), Reddy e Patil (2015). Ilustrações: Harlan e De Wet (1972).

Tabela 2. Raças de sorgo selvagem e possível centro de origem.

Grupo Genético Primário (2n =20)	
Raças de <i>S. bicolor</i> spp. <i>arundinaceum</i> (sorgos espontâneos e forrageiros)	
Raças básicas	Localização
1) <i>arundinaceum</i>	Zona florestal de Serra Leoa ao Congo
2) <i>ethiopicum</i>	Sudão
3) <i>virgatum</i>	Sudão, Egito
4) <i>verticilliflorum</i>	Da Etiópia a Nigéria
5) <i>propinquum</i>	Ásia Sul-Oriental e Filipinas
6) <i>shattercane</i>	Invasora de ampla dispersão
7) <i>sudanense</i> ¹	Estados Unidos – Capim-sudão (usado como forragem ou nas hibridações com o <i>S. bicolor</i> visando a produção do sorgo corte e pastejo)

Continua...

Tabela 2. Continuação

Grupo Genético Secundário (2n =40)	
Raças de <i>S. halepense</i>	
Raças básicas	Localização
1) halepense	Da costa do Mediterrâneo ao Paquistão.
2) milaceum	Do Paquistão ao sudeste da Ásia.
3) johnsongrass	Estados Unidos
4) almum	Argentina

Fonte: Harlan e De Wet (1972), Arnold (1983), International Board for Plant Genetic Resources, (1993), Fornasieri Filho e Fornasieri, (2009), Reddy e Patil (2015).

Domesticação

A evolução das formas das plantas domesticadas representa uma grande transição na história humana que facilitou a ascensão da civilização moderna. O sorgo é o cereal mais importante das zonas áridas, usado para alimentação humana, ração animal, fibra e combustível. O sorgo teve a sua transição de planta selvagem no nordeste da África (*S. bicolor* ssp. *Verticilliflorum*) para a forma domesticada ancestral (*S. bicolor* spp *bicolor*) no leste do Sudão milhares de anos atrás. Por fim, a domesticação possibilitou evolução dos quatro tipos adaptados nos mais variados ambientes: durra, caudatum, guiné e kafir (Dogget, 1988; Brown et al., 2011; Morris et al., 2013).

O sorgo é considerado uma cultura antiga, entretanto, o seu desenvolvimento, em muitas regiões agrícolas do mundo, ocorreu somente no final do século XIX. Nos Estados Unidos da América, a introdução do sorgo para grãos se deu por meio de sementes trazidas nos navios negreiros por ocasião do tráfico de pessoas escravizadas entre os anos 1500 e 1600 (Smith et al., 2019). Foi nos Estados Unidos, por meio dos trabalhos de melhoramento com as cultivares antigas, que se chegou aos diferentes tipos de sorgo hoje cultivados. Após um longo período de adaptação, várias experiências e trabalhos de melhoramento foram realizados, visando atender às novas modalidades de utilização e métodos culturais diferentes.

Um importante avanço na produção de sorgo foi motivado pelos maiores rendimentos de híbridos desenvolvidos nos Estados Unidos em meados da década de 1950 e que foram fomentados no “cinturão do sorgo” dos Estados Unidos (Texas Ocidental, Novo México, Oklahoma, Kansas e Nabraska) e na Argentina e no México (Swearingin et al., 1971).

No Brasil, apesar de ser considerada uma cultura de importância recente, o sorgo é cultivado na região Nordeste desde o século XIX, e foi trazido por escravizados africanos. Existem referências sobre cultivo, origem, regiões de adaptação, utilização, práticas culturais e recomendação de cultivares para produção de grãos, forragem, xarope e vassoura, desde o início do século XX, em um boletim editado pelo Ministério da Agricultura (Sorgo, 1918; Carmo, 1977). Existem relatos de 1938 do cultivo, em Pernambuco, de sorgo forrageiro, variedade Grohoma, utilizada na alimentação de animais, além da variedade Vira-Cacho, conhecida como “Milho da Angola”, que era utilizada principalmente para confecção de pipoca (Santos et al., 2005). As primeiras pesquisas com sorgo foram conduzidas pelo Instituto Pernambucano de Agropecuária (IPA), em 1957, com coleções de sorgo oriundas de Forth Collins (EUA) e norte da África.

Pesquisas visando principalmente o desenvolvimento de cultivares para as condições brasileiras iniciaram-se em 1972, no extinto Ipeaco/DNPEA. Nessa época procurava-se identificar limitações à produção, à utilização e à comercialização de grãos de sorgo, com a colaboração estreita entre os setores público e privado, especialmente da indústria de sementes. Com a criação da Embrapa, a liderança nas pesquisas com a cultura foi planejada com envolvimento de Universidades e OEPAS (Organizações Estaduais de Pesquisa Agropecuária). Na década de 80, houve um redirecionamento das estratégias de pesquisa nessa cultura, tendo em vista a mudança da fronteira agrícola no Brasil (Santos et al., 2005). Grande crescimento da produção ocorreu a partir desse período, principalmente com a concentração da área plantada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, na época da safrinha. As lavouras de sorgo granífero eram geralmente plantadas após a época ideal para cultivo do milho safrinha, e atualmente são conduzidas em condições mais adversas do que as normalmente verificadas para essa época de plantio. Essa situação tem desestimulado a utilização de tecnologias que conduzam ao aumento da produtividade e estimulado a adoção de sistemas de produção com foco na redução de custos. Dessa forma, estudos e desenvolvimento de novas cultivares foram direcionados para o sorgo granífero na safrinha e sorgo forrageiro no verão.

Importante destacar que as empresas do setor privado também possuem programas próprios de melhoramento e têm contribuído significativamente com híbridos competitivos para atendimento da demanda de cultivares adaptadas às várias condições de plantio no País.

Os tipos de sorgo explorados de acordo com as características e em função da sua utilização são: sorgo granífero, sorgo silageiro, sorgo sacarino, sorgo biomassa, sorgo vassoura e sorgo corte pastejo; esse último é um híbrido intraespecífico entre o *S. bicolor* e *S. sudanense*. O sorgo granífero se firmou na safrinha tardia (sucessão à soja) no Cerrado, e o silageiro, em regiões com clima árido onde a pecuária bovina exerce grande influência na economia local. Os demais grupos ainda não se firmaram, mas têm grande potencial de expansão em usinas de energia (sorgo biomassa e sacarino) e em áreas de pequenos produtores (vassoura).

Conversão

O sorgo tem boa adaptação nos mais variados extremos de condições ambientais, incluindo áreas áridas, semiáridas e subtropicais do mundo. É relatado seu cultivo do nível do mar até 3.000 m de altitude. O programa de conversão de sorgo teve grande impacto no melhoramento dessa cultura, pois atualmente é difícil encontrar híbridos de sorgo cultivados que não tenham germoplasma convertido em seu pedigree. O sorgo é uma espécie diploide com $2n = 20$ cromossomos (Santos et al., 2005), pertencente à família Poacea, autógama, com taxa de fecundação cruzada variando entre 2% e 10% em condições normais, resposta fotoperiódica de dias curtos e altas taxas fotossintéticas (Paul, 1990).

Segundo Dillon et al. (2007), a domesticação e a superdomesticação resultantes do sorgo dependeram principalmente de *S. bicolor* subsp. *bicolor*. Contudo, para obter ganhos significativos na produção agrícola, as espécies de sorgo não domesticado oferecem uma riqueza inexplorada de novos traços de resistência ao estresse biótico e abiótico e de produtividade. Isso demonstra o enorme potencial para exploração desses recursos genéticos para as mais diversas características agrônômicas de interesses. Neste sentido, novos caminhos serão abertos para obtenção de maior produtividade e estabilidade da produção em condições marginais de cultivo com ampliação da faixa de adaptação às condições de solo e clima mais moderadas e maior tolerância a pragas e doenças (Bapat; Mote, 1982; House et al., 1995; Karunakar et al., 1994; Franzmann; Hardy, 1996; Sharma; Franzmann, 2001; Kamala et al., 2002; Komolong et al., 2002; Dillon et al., 2007).

O processo de domesticação do sorgo envolveu a mudança em várias características da planta. Um eixo primário resistente (ráquis) e a persistência de espiguetas sésseis provavelmente foram introduzidos no

início do processo de domesticação. É provável que a transformação de uma inflorescência aberta em um tipo mais compacto tenha envolvido várias mudanças, como aumento no número de ramificações por nó; aumento no número de ramos por inflorescência primária na ráquis; e uma diminuição no comprimento do internódio na ráquis. O aumento no tamanho da semente também foi provavelmente um produto da domesticação, o que a levou a se projetar das glumas (House, 1985). Essas mudanças contribuíram para aumento no rendimento em relação às variedades originais de sorgo.

Variedades de sorgo estáveis e de alto rendimento foram recentemente desenvolvidas por meio de programas de melhoramento utilizando variedades de sorgo da África, Índia e China. Isso envolveu a seleção de características como insensibilidade ao fotoperíodo, menor altura de planta (para reduzir o acamamento), tolerância à seca e resistência a pragas e doenças (Reddy et al., 2006b). A altura das plantas e a insensibilidade ao fotoperíodo foram o foco dos programas de conversão que desenvolveram linhagens de sorgo com altura e maturidade desejáveis das plantas, que foram utilizadas em programas de melhoramento em ambientes tropicais, em dias curtos e longos, e climas temperados e subtropicais.

Como o sorgo se originou no nordeste da África, as muitas raças e variedades precoces eram sensíveis ao fotoperíodo, com período crítico de 12 horas de luz. Quando a duração do dia é menor que 12 horas, a planta de sorgo muda do crescimento vegetativo para o reprodutivo (Reddy et al., 2006b). O uso dessas linhagens sensíveis ao fotoperíodo no verão em zonas temperadas da América e da Austrália, onde a duração do dia é superior a 13 horas, era impraticável, especialmente porque muitas características relacionadas ao crescimento não se expressam nessas condições de dia longo (Reddy et al., 2006b). Isso dificultou a criação de variedades melhoradas em climas temperados e subtropicais semiáridos. Neste sentido foi necessário identificar cultivares e raças encontradas na Índia com fotoperíodos críticos mais altos, sem atraso na floração quando cultivadas em dias de até 17 horas de luz. Desde então, essas cultivares de sorgo insensíveis ao fotoperíodo têm sido amplamente adotadas em programas de melhoramento em todo o mundo (Rai et al., 1999; Reddy et al., 2006a).

A altura da planta e o rendimento de grãos são altamente correlacionados em algumas populações de sorgo, com produtividade máxima alcançada em alturas de cerca de 1,75 m - 1,80 m, e florescimento de 68 a 70 dias (Miller, 1982; Rao; Rana, 1982). No entanto, plantas de

sorgo dessa altura acamam facilmente, o que praticamente inviabiliza seu uso na agricultura moderna. Uma seleção de linhagens de sorgo alto e bom rendimento de grãos foi cruzada com linhagens de sorgo de menor estatura e insensíveis ao fotoperíodo para desenvolver cultivares de alto rendimento e com menor estatura (Miller et al., 1997; Rosenow; Dahlberg, 2000), com os híbridos atuais possuindo plantas entre 1 m e 1,5 m de altura.

Mesmo em regiões onde o sorgo poderia ser cultivado em condições edafoclimáticas favoráveis ele é preterido em relação a outras culturas, como é o caso do Brasil, onde a maior parte do sorgo é cultivado na segunda safra, após o cultivo da safra principal no verão, de soja ou de milho. Todavia, para o sistema de produção brasileiro, o sorgo assume um papel preponderante por viabilizar uma segunda safra com menores riscos de perdas onde a restrição hídrica inviabiliza o cultivo dessas outras culturas. Assim, de modo geral, o sorgo no mundo é cultivado predominantemente em ambientes com baixa pluviosidade, regiões áridas a semiáridas, chamadas comumente de regiões marginais. Neste contexto, a ocorrência total de estresse hídrico é o principal fator que limita a produção mundial de sorgo. Duas formas de estresse hídrico foram identificadas no sorgo: ‘pré-antese’, em que as plantas são estressadas durante a diferenciação da panícula antes da floração; e ‘pós-antese’, quando ocorre estresse de umidade durante o estágio de enchimento de grãos (Rosenow; Clark, 1995). Com a identificação de variedades e linhagens com níveis naturalmente altos de tolerância à seca antes da antese e a seleção destes para rendimentos mais altos desenvolveram-se variedades de sorgo com rendimentos altos e estáveis (Ellis et al., 1997).

Essa tolerância à seca pós-floração é chamada de “stay green”, em que as plantas mantêm área foliar verde e fotossíntese ativa sob forte estresse de umidade, o que resulta em maior produtividade de grãos em comparação com variedades senescentes (Borrell; Douglas, 1997; Borrell et al., 1999). O estresse após a antese deverá resultar em perda significativa de rendimento por resultar na produção de grãos pequenos e leves, morte prematura das plantas, suscetibilidade a doenças e acamamento das plantas.

A melhoria no rendimento do sorgo ao longo do tempo ocorreu com o desenvolvimento de tipos anão, insensíveis ao fotoperíodo, mais resistentes aos estresses hídricos, pragas e doenças, entre outros. Contudo, o uso da macho-esterilidade e o desenvolvimento de híbridos com essas características foram preponderantes para o notável aumento de rendimento da cultura na ordem de mais de 300% desde a década de 1950 (Rooney; Smith, 2000).

As cultivares híbridas utilizam a esterilidade masculina para aprimorar as habilidades combinadas das linhagens parentais, resultando em heterose e aumentos significativos em características fenotípicas, como produtividade, altura da planta e dias de floração (Reddy et al., 2006a).

Coleções Mundiais

Os recursos genéticos das plantas são definidos pelo “International Plant Genetic Resources Institute” como o “Material genético das plantas que é valioso como recurso para as gerações presentes e futuras de pessoas” (International Board for Plant Genetic Resources, 1993). Sua importância foi reconhecida na plataforma intergovernamental, sob a égide da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), como a “herança comum da humanidade” - que deve ser disponibilizada sem restrições (FAO, 1983).

O uso intensivo da terra para ampliação das áreas para produção de alimento, assentamentos humanos concomitantemente com as catástrofes naturais (secas, inundações, incêndios, etc.) têm levado à destruição de habitats vegetais e causado perdas de diversidade de inúmeros organismos. Neste sentido é necessário conservar os recursos genéticos antes de perdermos, e assim dispor de todas as ferramentas para o desenvolvimento de uma agricultura capaz de mitigar o impacto das mudanças climáticas globais e atender com alimentos de qualidade a uma população mundial crescente.

Desse modo, o desenvolvimento da agricultura passará pela exploração da diversidade genética das culturas em busca das fontes de resistência a patógenos, insetos pragas, tolerância à ampla faixa de temperatura do ar e umidade do solo, maior eficiência no uso dos nutrientes e com isso maior estabilidade e produção nesses ambientes, maior qualidade nutricional tanto para humanos quanto para animais. Também será possível explorar esses recursos genéticos para atender prováveis necessidades das indústrias no desenvolvimento de novos produtos.

Os recursos genéticos do sorgo são conservados em muitos centros ao redor do mundo. No nível global, as coleções de germoplasma de sorgo consistem em aproximadamente 168.500 acessos. As principais organizações e países que mantêm os recursos genéticos do sorgo são o Instituto Internacional de Pesquisa de Cultivos para os Trópicos Semiáridos (ICRISAT) localizado em Patancheru no estado indiano de Andhra Pradesh; o Sistema Nacional de Germoplasma Vegetal (NPGS) nos Estados Unidos, na Etiópia, no Sudão, na

África do Sul, na Índia e na China, principalmente porque eles têm grandes programas de melhoramento (Rosenow; Dahlberg, 2000). No Brasil, o Banco Ativo de Germoplasma (BAG Sorgo) da Embrapa configura importante fonte de germoplasma para os programas de melhoramento públicos e privados no País. Atualmente, há 7.213 acessos catalogados, com ampla variabilidade, oriundos da Coleção Mundial (ICRISAT – contribuindo com mais de 2.000 entradas) e de outras coleções do CIAT (Colômbia), vários países da África, Índia, Rússia, China e instituições públicas americanas (USDA, Purdue University, Texas A&M University, Kansas State University, Oklahoma State University – com mais de 1.300 entradas) (Santos et al., 2005; Netto, 2010).

O primeiro grande esforço mundial para montar uma coleção mundial de sorgo foi realizado na década de 60 pela Rockefeller Foundation, no Indian Agricultural Research Program (House, 1985; Rockefeller Foundation, 1970; Murty et al., 1967), citado por (Mengesha; Prasada Rao, 1982). Entretanto do total de 16.138 acessos obtidos de diferentes países e designados I.S. “Indian Sorghums” numbers, apenas metade dos acessos é de autêntico “indigenouns collection” com suficiente informação sobre sua origem (Harlan; De Wet, 1972). Ademais, dos 16.138 acessos apenas 8.961 foram transferidos para o ICRISAT em função da perda de sua viabilidade por causa das precárias condições de armazenamento (Mengesha; Prasada Rao, 1982). Contudo, o ICRISAT em 1975-1976 conseguiu através da Universidade de Purdue, Laboratório Nacional de Armazenamento de Sementes, Fort Collins, EUA, e Mayaguez, Porto recuperar 3.764 acessos, mas, ainda assim, deixaram uma lacuna de 3.413, excluindo a recente adição de 619 acessos (Reddy et al., 2006a).

Mengesha e Prasada Rao (1982) mostram a evolução de acessos da coleção de germoplasma de sorgo do ICRISAT de 1974, quando tinha 8.961 acessos, até 1981, quando atingiu 21.264 acessos de 68 países. Isso se deve ao esforço contínuo dessa e de outras instituições e a responsabilidade recebida de incorporar a coleção mundial de sorgo em 1974 de acordo com as recomendações feitas pelo Comitê Consultivo em Germoplasma de Sorgo e Milheto, patrocinado pelo Conselho Internacional de Recursos Genéticos Vegetais (International Board of Plant Genetic Resources, 1976; Prasada Rao et al., 1989). Em 2006, o ICRISAT atingiu 36.774 acessos oriundos de 90 países (Reddy et al., 2006a). Em 2017, o ICRISAT mantinha 39.923 acessos de 93 países, incluindo 8.020 acessos da África Ocidental e Central

(Upadhyaya et al., 2017). Cerca de 90% dessas coleções são provenientes de países em desenvolvimento nos trópicos semiáridos. Aproximadamente 60% dessa coleção vieram de seis países: Índia, Etiópia, Sudão, Camarões, Suazilândia e Iêmen. Estima-se que essa coleção representa aproximadamente 80% da variabilidade presente em sorghum (Eberhart et al., 1997). Contudo, ao analisar 8.020 acessos da África Ocidental e Central, Upadhyaya et al. (2017) verificaram muitas lacunas geográficas nessa coleção, que aliadas à baixa intensidade de coleta de sorgo reforçam a necessidade do lançamento de missões de coleta para preencher essas lacunas, particularmente em regiões de sorgo predominantemente guineense.

O germoplasma mantido no ICRISAT consiste em cinco raças básicas: bicolor, guiné, caudatum, kafir e durra e suas 10 raças híbridas. No entanto, a coleção é representada predominantemente por três raças: durra (23,5%), caudatum (20,6%) e guiné (14,8%). Das 10 raças híbridas, apenas três são comuns: durra-caudatum (11,5%), guiné-caudatum (9,2%) e durra-bicolor (7,1%). Índia, Uganda e Zimbábue têm todas as cinco raças básicas e dez híbridas (Reddy et al., 2002). Guiné-caudatums, durra e suas raças híbridas estão bem representadas na Etiópia, e caudatum e seus raças híbridas, no Sudão (Reddy et al., 2006a).

Etiópia, um dos mais ricos centros de diversidade, na década de 1980, tinha acumulado pelo Ethiopian Sorghum Improvement Project (ESIP) em torno de 5.500 acessos e atingiu no início dos anos 2000 em torno de 8.000 acessos (Rosenow; Dahlberg, 2000). Um destaque é a coleção de raças sudanenses, que foi montada em 1950, sendo mais adiante incorporada pelo Rockefeller Foundation Project na Índia (Rosenow et al., 1999).

Por volta de 1905, o departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) empreendeu coleta e distribuição de sorgo. Texas foi selecionado como a primeira estação de pesquisa para trabalhar com sorgo em colaboração com USDA e Texas Agricultural Experimental Station (Quinby, 1974). O total de aproximadamente 42.221 acessos de germoplasma tem sido mantido pelo sistema nacional de germoplasma vegetal (NPGS) dos Estados Unidos da América (Dahlberg; Spinks, 1995). Atualmente, esse número já ultrapassou 45 mil acessos (National Plant Germplasm System, 2020).

A China, com 12.836 acessos, e o National Research Centre for Sorghum (NRCS) da Índia, com 20.812 acessos, também são destaques na conservação de germoplasma de sorgo (Qingshan; Dahlberg 2001; Reddy et al., 2006a).

Tabela 3. Principais bancos de germoplasma de sorgo no globo.

Região/País	Empresa/Organização	Selvagem	Cultivado
África			
Etiópia	Institute of Biodiversity Conservation (IBC)		9772
Quênia	National GeneBank of Kenya, Crop Plant Genetic Resources CentredMuguga (KARI-NGBK)	92	5774
Zâmbia	SADC Plant Genetic Resources Centre (SRGB)	27	3692
América			
Estados Unidos	Plant Genetic Resources Conservation Unit, southern Regional Station Plant Introduction Station, University of Georgia, National Centre for Genetic Resources Preservation	199	43511
Brasil	Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia		10812
México	Programa de Recursos Genéticos, Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (CIFAP-MEX), Estacion de Iguala, Instituto Nacional de Investigaciones Agricolas (INIA-Iguala)		5500
Ásia			
Índia	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT)	461	39092
Índia	ICAR National Bureau of Plant Genetic Resources	11	20555
Índia	Indian Institute of Millets Research	27	23059
China	Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences (ICS-CAAS)		18263
Japão	Department of Genetic Resources National Institute of Agrobiological Sciences (NIAS)	13	5061
Paquistão	Plant Genetic Resources Programme (PGRP)	16	1716
Europa			
Rússia	NI Vavilov All-Russian Scientific Research institute of Plant Industry (VIR)		3963
França	Laboratoire des Ressources Genetiques et Amelioration des Plantes Tropicales, ORSTOM, Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Developpement (CIRAD)	27	7278
Austrália			
Austrália	Australian Tropical Crops and Forages Genetic Resources Centre (ATCFA)	346	4144

Fonte: adaptado de Venkateswaran et al. (2019).

As coleções mundiais de sorgo somam 235.690 acessos (98,3% são cultivados e 1,7% são parentes silvestres e invasores), dos quais a maioria é conservada na Ásia (39,2%), nas Américas (35,7%) e na África (16,4%) (Upadhyaya et al., 2017). A coleção nacional de sorgo indiano mantida no National GeneBank do National Bureau of Plant Genetic Resources, Nova Delhi, compreende 20.066 acessos, o que representa apenas 8,5% das coleções globais de sorgo. Além dessa coleção, o Instituto Indiano de Pesquisa de Millets, Hyderabad, Índia, também mantém um conjunto de coleções em seu módulo de armazenamento de médio prazo. São 23.086 acessos a granel. Atualmente, a coleção de sorgo do ICRISAT, que é uma das maiores, contém 39.553 (16,8% das coleções globais) acessos originários de 93 países e compreende 34.156 variedades locais, 4.836 linhas de reprodução avançada, 100 cultivares e 461 parentes selvagens e invasores. Na Tabela 1, são listadas as principais coleções de bancos de germoplasma de acordo com Venkateswaran et al. (2019). No Brasil, acessos de sorgo são mantidos na Embrapa Milho e Sorgo, com cópias de parte destes acessos na Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia.

Referências

ARNOLD, T. H. African Biodiversity & Conservation. **Bothalia**, v. 14, n. 3, p. 587-594, 1983.

BAPAT, D. R.; MOTE, U. N. Sources of shootfly resistance in Sorghum. **Journal of the Maharashtra Agricultural University**, v. 7, p. 238-240, 1982.

BORRELL, A. K.; DOUGLAS, A. C. L. Maintaining green leaf area in grain sorghum increased nitrogen uptake under post-anthesis drought. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 38, p. 89-92, 1997.

BORRELL, A. K.; BIDINGER, F. R.; SUNITHA, K. Stay-green associated with yield in recombinant inbred sorghum lines varying in rate of leaf senescence. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 40, p. 31-33, 1999.

BROWN, P. J.; MYLES, S.; KRESOWICH, S. Genetic support for a phenotype-based racial classification in sorghum. **Crop Science**. v. 51, p. 224-230, 2011.

CARMO, C. M. **Sorgo no Ceará**: pesquisa e perspectiva. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1977.

CELARIER, P. R. Cytotaxonomy of Andropogoneae. **Cytologia**, v. 24, n. 3, p. 285, 1959.

CLAYTON, W. D. Andropogoneae. In: SODERSTROM, T. R.; HILU, K. W.; CAMPBELL, C. S.; BARKWORTH, M. E. (ed.). **Grass systematics and evolution**. Washington: Smithsonian Institution Press, 1987. p. 307-309.

CLAYTON, W. D.; RENVOIZE, S. A. **Genera graminum**: grasses of the world. Kew: Royal Botanic Gardens, 1986.

DAHLBERG, J. A.; SPINKS, M. S. Current status of the US sorghum germplasm collection. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 36, p. 4-12, 1995.

DAMANIA, A. B. The Hindustan centre of origin of important plants. **Asian Agri-History**, v. 6, n. 4, p. 333-341, 2002.

DE WET, J. M. J. Systematics and evolution of sorghum Sect. Sorghum (Gramineae). **American Journal of Botany**, v. 65, p. 477-484, 1978.

DILLON, S. L.; SHAPTER, F. M.; HENRY R. J.; CORDEIRO, G.; ISQUIERDO, L.; LEE, S. Domestication to crop improvement: genetic resources for sorghum and saccharum (Andropogoneae). **Annals of Botany**, v. 100, n. 5, p. 975-989, 2007.

DOGGETT, H. **Sorghum** 2. ed. Harlow: Longman, 1988.

EBERHART, S. A.; BRAMEL-COX, P. J.; PRASADA-RAO, K. E. Preserving genetic resources. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC IMPROVEMENT OF SORGHUM AND PEARL MILLET, 1996, Lubbock. **Proceedings...** Cali: INTSORMIL: ICRISAT, 1997. p. 25-41.

ELLIS, R. H.; QI, A.; CRAUFURD, P. Q.; SUMMERFIELD, R. J.; ROBERTS, E. H. Effects of photoperiod, temperature and asynchrony between thermoperiod and photoperiod on development to panicle initiation in sorghum. **Annals of Botany**, v. 79, n. 2, p. 169-178, 1997.

FAO. **International undertaking on plant genetic resources**. Rome, 1983. Disponível em: [http://www.fao.org/docrep/x5563E/X5563e0a.htm#e.%20plant%20genetic %20resources%20\(follow%20up%20of%20conference%20resolution%20681](http://www.fao.org/docrep/x5563E/X5563e0a.htm#e.%20plant%20genetic%20resources%20(follow%20up%20of%20conference%20resolution%20681). Acesso em: 5 out. 2020.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do sorgo**. Jaboticabal: Funep, 2009. 202 p.

FRANZMANN, B. A.; HARDY, A. T. Testing the host status of Australian indigenous sorghums for the sorghum midge. In: AUSTRALIAN SORGHUM CONFERENCE, 3., 1996, Tamworth. **Proceedings...** Melbourne: Australian Institute of Agricultural Science, 1996. p. 365-367.

HARLAN, J. R.; DE WET, J. M. J. A simplified classification of cultivated plants. **Taxon**, v. 20, p. 509-517, 1972.

HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. 2. ed. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid tropics, 1985. 206 p.

HOUSE, L. R.; OSMANZAI, M.; GOMEZ, M. I.; MONYO, E. S.; GUPTA, S. C. Agronomic principles. In: DENDY, D. A. V. (Ed). **Sorghum and millets: chemistry and technology**: St Paul: American Association of Cereal Chemists, 1995. p. 27-67.

INTERNATIONAL BOARD FOR PLANT GENETIC RESOURCES. **Descriptors for sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. Rome, 1993.

INTERNATIONAL BOARD OF PLANT GENETIC RESOURCES. **Report for the first meeting of the Advisory Committee on Sorghum and Millets Germplasm**. Rome, 1976.

KAMALA, V.; SINGH, S. D.; BRAMEL, P. J.; RAO, D. M. Sources of resistance to downy mildew in wild and weedy sorghums. **Crop Science**, v. 42, n. 4, p. 1357-1360, 2002.

KARUNAKAR, R. I.; NARAYANA, Y. D.; PANDE, S.; MUGHOGHO, L. K.; SINGH, S. D. Evaluation of wild and weedy sorghums for downy mildew resistance. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 35, p. 104-106, 1994.

KOMOLONG, B.; CHAKRABORTY, S.; RYLEY, M.; YATES, D. Identity and genetic diversity of the sorghum ergot pathogen in Australia. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 6, p. 621-628, 2002.

MANN, J. A.; KIMBER, C. T.; MILLER, F. R. **The origin and early cultivation of sorghums in Africa**. Texas: Texas Agricultural Experiment Station, 1983. (Texas Agricultural Experiment Station Bulletin, 1454). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1969.1/128074>. Acesso em: 5 out. 2020.

MENGESHA, M. H.; PRASADA RAO, E. K. **Current situation and future of sorghum germplasm**. Mali: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1982.

MILLER, F.; MULLER, N.; MONK, R.; MURTHY, D. S.; OBILANA, A. B. Breeding photoperiod insensitive sorghums for adaptation and yield. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC IMPROVEMENT OF SORGHUM AND PEARL MILLET, 1996, Lubbock. **Proceedings...** Cali: INTSORMIL: ICRISAT, 1997.

MILLER, F. R. Genetic and environmental response characteristics of sorghum. In: HOUSE, L. R.; MUNGHOGHO, L. K.; PEACOCK, J. M. (ed.). **Sorghum in the eighties**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1982. p. 393-402.

MORRIS, G. P.; RAMU, P.; DESHPANDE, S. P.; HASH, C. T.; SHAH, T.; UPADHYAYA, H. D.; RIERA-LIZARAZU, O.; BROWN, P. J.; ACHARYA, C. B.; MITCHELL, S. E.; HARRIMAN, J.; GLAUBITZ, J. C.; BUCKLER, E. S.; KRESOVICH, S. Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v. 110, n. 2, p. 453-458, 2013.

MURTY, B. R.; ARUNACHALAM, V.; SAXENA, M. B. L. Cataloguing classifying a world collection of genetic stocks of sorghum. **Indian Journal of Genetics**, v. 27, p. 313-337, 1967.

NATIONAL PLANT GERMPLASM SYSTEM. **Genetic resource collections**. Disponível em: <<https://www.ars-grin.gov/Pages/Collections>>. Acesso em: 6 out. 2020.

NETTO, D. A. M. **Coleção de base e coleção ativa**: o banco de germoplasma de sorgo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 99).

PAUL, C. L. Aspectos fisiológicos del crecimiento y desarrollo del sorgo. In: PAUL, C. L. **Agronomía del sorgo**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1990. p. 43-68.

PRASADA RAO, K. E.; MENGESHA, M. H.; REDDY, V. G. International use of sorghum germplasm collection. In: BROWN, A. H. D.; FRANKEL, O. H.; MARSHALL, D. R.; WILLIAMS, J. T. (ed.). **The use of plant genetic resources**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. p. 150-167.

QINGSHAN, L.; DAHLBERG, J. A. Chinese sorghum genetic resources. **Economic Botany**, v. 55, n. 3, p. 401-425, 2001.

QUEIROZ, V. A. V.; VIZZOTTO, M.; CARVALHO, C. W. P.; MARTINO, H. S. D. **O sorgo na alimentação humana**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 133).

QUINBY, J. R. **Sorghum improvemem and the genetics of growth**. Texas: Texas A&M University, 1974.

RAI, K. N.; MURTY, D. S.; ANDREWS, D. J.; BRAMEL-COX, P. J. Genetic enhancement of pearl millet and sorghum for the semi-arid tropics of Asia and Africa. **Genome**, v. 42, n. 4, p. 617-628, 1999.

RAO, N. P. G.; RANA, B. S. Selection in temperate and tropical crosses of sorghum. In: HOUSE, L. R.; MUNGHOGHO, L. K.; PEACOCK, J. M. (ed.). **Sorghum in the eighties**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1982. p. 403-420.

REDDY, B. V. S.; KUMAR, A. A.; REDDY P. S.; ELANGOVA, M. Sorghum germplasm: diversity and utilization. In: BANTILAN, M. C. S.; GOWDA, C. L. L.; REDDY, B. V. S.; OBILANA, A. B.; EVENSON, R. E. (ed.). **Sorghum genetic enhancement: research process, dissemination and impacts**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2006a. p. 153-169.

REDDY, B. B. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. Sorghum genetic resources, cytogenetics and improvement. In: SINGH, R. J.; JAUHAR, P. P. (ed.). **Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement: cereals**. Boca Raton: CRC Taylor and Francis, 2006b. v. 2, p. 309-363.

REDDY, V. G.; RAO, N. K.; REDDY, B. V. S.; RAO, K. E. P. Geographic distribution of basic and intermediate races in the world collection of sorghum germplasm. **International Sorghum and Millets Newsletter**, v. 43, p. 15-17, 2002.

REDDY, P. S.; PATIL, J. V. **Genetic enhancement of rabi sorghum: adapting the Indian Durras**. Amsterdam: Elsevier, 2015. 248 p.

ROCKEFELLER FOUNDATION. **World collection of sorghums: list of pedigrees and origins**. New York, 1970.

ROONEY, W. L.; SMITH, C. W. Techniques for developing new cultivars. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. (ed.). **Sorghum: origin, history, technology and production**. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 329-347.

ROSENOW, D. T.; CLARK, L. E. Drought and lodging resistance for a quality sorghum crop. In: ANNUAL CORN AND SORGHUM INDUSTRY RESEARCH CONFERENCE, 50., 1995, Chicago. **Proceedings...** Chicago: ASTA, 1995, p. 82-97.

ROSENOW, D. T.; DAHLBERG, J. A. Collection, conversion and utilization of sorghum. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. (ed.). **Sorghum: origin, history, technology and production**. New York: John Wiley, Sons, 2000. p. 309-328.

ROSENOW, D. T.; WOODFI, N. C. A.; CLARK, L. E.; SIJ, J. W. Drought resistance in exotic sorghum. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY; ANNUAL MEETING OF

THE CROP SCIENCE SOCIETY OF AMERICA; ANNUAL MEETING OF THE SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 1999, Salt Lake City. **Abstracts...** Madison: Agronomy Society of America, 1999. p. 166.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 605-658.

SHARMA, H. C.; FRANZMANN, B. A. Host-plant preference and oviposition responses of the sorghum midge, *Stenodiplosis sorghicola* (Coquillett) (Dipt., Cecidomyiidae) towards wild relatives of sorghum. **Journal of Applied Entomology**, v. 125, p. 109-114, 2001.

SMITH, O.; NICHOLSON, W. V.; KISTLER, L.; MACE, E.; CLAPHAM, A.; ROSE, P.; STEVENS, C.; WARE, R.; SAMAVEDAM, S.; BARKER, G.; JORDAN, D.; FULLER, D. Q.; ALLABY, R. G. A domestication history of dynamic adaptation and genomic deterioration in Sorghum. **Nature Plants**, v. 5, p. 369-379, 2019.

SORGO. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, 1918.

SWEARINGIN, M. L.; FOLEY, J. R.; MORRIS, W. H. M.; NEVES, J. D. **Estudo da viabilidade do sorgo granífero para o Nordeste brasileiro**. College Station: Universidade de Purdue, 1971. 148 p.

UPADHYAYA, H. D.; REDDY, K. N.; VETRIVENTHANA, M.; AHMEDD, M. I. A.; KRISHNAD, G. M.; REDDY, M. T.; SINGHA, S. K. Sorghum germplasm from West and Central Africa maintained in the ICRISAT genebank: Status, gaps, and diversity. **The Crop Journal**, v. 5, n. 6, p. 518-532, 2017.

VAVILOV, N. I. **Origin and geography of cultivated plant**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 505 p.

VENKATESWARAN, K.; ELANGO VAN, M.; SIVARAJ, N. Origin, domestication and diffusion of *Sorghum bicolor*. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; VENKATESH BHAT, B.; TONAPI, V. A. **Breeding sorghum for diverse end uses**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 15-31.

WENDORF, F.; CLOSE, A. E.; SCHILD, R.; WASYLIKOWA, K.; HOUSLEY, R. A.; HARLAN, J. R.; KRÓLIK, H. Saharan exploitation of plants 8,000 years bp. **Nature**, v. 359, p. 721-724, 1992.

WINCHELL, F.; BRASS, M.; MANZO, A.; BELDADOS, A.; PERNA, V.; MURPHY, C.; STEVENS, C.; FULLER, D. Q. On the origins and dissemination of domesticated sorghum and pearl millet across Africa and into India: a view from the Butana Group of the Far Eastern Sahel. **African Archaeological Review**, v. 35, p. 483-505, 2018.

Capítulo 3

Biologia e fisiologia do sorgo

Paulo César Magalhães
Thiago Corrêa de Souza
Kamila Rezende Dázio de Souza

Aspectos Gerais do Sorgo e sua Biologia

O sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) é uma planta originária da África, contudo algumas evidências indicam que pode ter havido duas regiões de dispersão independentes (África e Índia). Segundo Doggett (1988), os sorgos cultivados atualmente se originam do silvestre *Sorghum bicolor* subsp. *arundinaceum*, e a maior variação do gênero *Sorghum* se encontra no quadrante centro-oeste da África, abaixo do Saara, na região da Etiópia-Sudão, de onde o gênero ancestral, com um número básico de cinco cromossomas, provavelmente se originou há 5.000 - 6.000 anos (Berenji et al., 2011). Sabe-se que nas Américas a introdução do sorgo foi pelo Caribe por meio dos africanos escravizados. No séc. XIX, também pela mão dos escravizados, o sorgo foi introduzido nos Estados Unidos, e nesse país, mediante estudos de melhoramento genético com cultivares antigas, é que se chegou aos tipos de sorgo cultivados hoje. No Brasil não foi diferente. O sorgo chegou através dos negros escravizados trazidos da África, mas por muito tempo a cultura foi pouco utilizada, até uma reintrodução no Rio Grande do Sul (Von Pinho et al., 2014).

A planta de sorgo adapta-se a uma ampla variação de ambientes e produz sob condições desfavoráveis à maioria dos outros cereais. Ela possui sementes com habilidade de manter-se dormente durante o período de seca, e, com a retomada de umidade, ela volta ao crescimento, com relativa boa resistência à dessecação (Sans et al., 2003). Quando comparado ao milho, por exemplo, o sorgo possui as seguintes diferenças que favorecem sua sobrevivência em condições de menor disponibilidade hídrica: (1) sistema radicular mais desenvolvido e fibroso, capaz de melhor explorar o perfil do solo em busca de água; (2) reduzido nível de transpiração, com regulação estomática mais eficaz; (3) área foliar mais reduzida; (4) cobertura cerosa presente nos colmos e nas folhas da planta (Fornasieri Filho; Fornasieri,

2009). Por causa da sua adaptação à seca, é considerado um cultivo mais apto para as regiões áridas com chuvas escassas (Tabosa et al., 2002; Monteiro et al., 2004; Ávila, 2018). A cultura do sorgo está se expandindo cada vez mais no Brasil, principalmente no período de safrinha, em sucessão às culturas de verão (Silva, 2018).

O sorgo pode ser classificado de acordo com seu uso: 1- sorgo para grão; 2- sorgo doce; 3- sorgo forrageiro; 4- sorgo para vassoura; 5- sorgo para biomassa e outros propósitos. Ou ainda o sorgo pode ser classificado quanto às características agronômicas: 1- granífero (porte baixo, utilizado na colheita mecânica); 2- silageiro (porte alto, adaptado para a produção de silagem); 3- sacarino (adaptado para a produção de etanol e açúcar); 4- corte e pastejo (utilizado para pastejo extensivo ou corte fresco); 5- vassoura (panículas utilizadas como vassouras) (Doggett, 1988; Bennett et al., 1990; Borém et al., 2014).

O sorgo é uma planta autógama, com baixa taxa de fecundação cruzada. A planta de sorgo apresenta metabolismo fotossintético do tipo C4, resposta fotoperiódica típica de dia curto e de altas taxas fotossintéticas. A grande maioria dos materiais genéticos comerciais de sorgo requer temperaturas superiores a 21 °C para um bom crescimento e desenvolvimento (Paul, 1990). A planta de sorgo tolera o déficit de água e o excesso de umidade no solo, mais do que a maioria dos outros cereais, e pode ser cultivada numa ampla faixa de condições de solo (Doggett, 1970; Sharma et al., 2005; Bibi et al., 2010).

O sorgo geralmente possui um sistema radicular profundo (Assefa; Staggenborg, 2011), o que lhe confere maior exploração do solo e certa tolerância ao déficit hídrico. Assim como em qualquer outra planta, as raízes mais grossas são responsáveis pela fixação da planta no solo, e as raízes finas (menor que dois milímetros) são responsáveis pela absorção de água e sais minerais (Wilcox et al., 2004). De acordo com Magalhães et al. (2014), os tipos de raízes encontrados no sorgo são primárias ou seminais, secundárias e adventícias (Figura 1). As primárias podem ser uma ou várias, são pouco ramificadas e morrem após o desenvolvimento das raízes secundárias. As secundárias se desenvolvem no primeiro nó, são bastante ramificadas e formam o sistema radicular principal. Já as adventícias podem aparecer nos nós acima do solo. Geralmente aparecem como sinal de falta de adaptação. Elas são ineficientes na absorção de água e nutrientes, sendo a função delas mais de suporte.

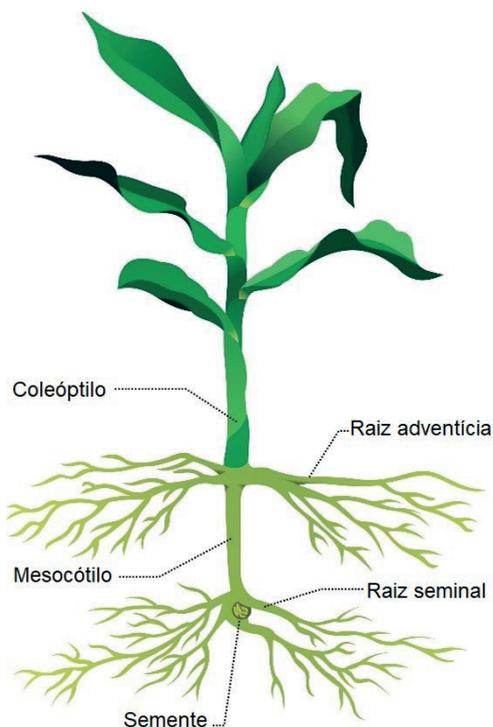


Figura 1. Sistema radicular da planta de sorgo mostrando os tipos de raízes.
Fonte: adaptado de Paul (1990).

O caule do sorgo é do tipo colmo (Figura 2) com 7 a 24 nós, dependendo do genótipo. A quantidade de nós é determinada por genes de maturação e por sua reação ao fotoperíodo e à temperatura. Já a distância dos entrenós é influenciada por quatro genes, além do ambiente, e a distância do pedúnculo e da panícula com frequência são independentes (Magalhães et al., 2014). No sorgo sacarino, o colmo possui grande quantidade de açúcares. O sorgo possui dominância apical constituindo-se de apenas um colmo, porém esta dominância apical pode ser quebrada a partir de algum dano nesse órgão, ocorrendo brotamento de outras gemas (perfilhamento).

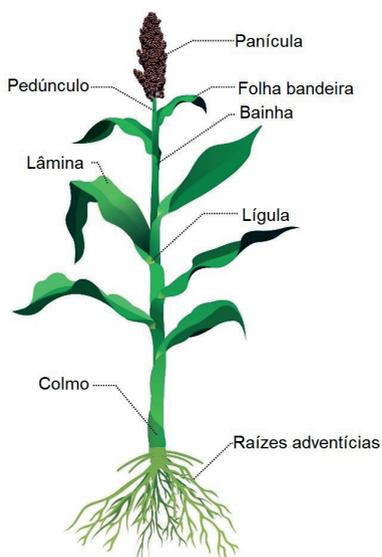


Figura 2. Partes da planta de sorgo.

Fonte: adaptado de Paul (1990).

A folha do sorgo é anfiestomática, ou seja, possui estômatos em ambas as faces (adaxial e abaxial) e ela é dividida em bainha, a qual se liga ao nó e envolve o internódio acima, e limbo (lâmina foliar) (Figura 2). A lígula é uma estrutura marcante no sorgo, que é a junção da bainha com o internódio (Figura 2) (Doggett, 1970). Na planta de sorgo do tipo granífero pode-se encontrar de 7 a 14 folhas, porém o número total de folhas numa planta pode chegar até 30. O comprimento da folha pode chegar a mais de 1 metro, enquanto a largura é de 0,5 a 15 cm (Von Pinho et al., 2014).

Os fatores que determinam o número de folhas no sorgo são cultivar, fotoperíodo e temperatura (Clerget et al., 2008). Pode-se encontrar plantas de sorgo com folhas posicionadas verticalmente ou horizontalmente, concentrando-se mais na base ou uniformemente distribuídas na planta. As folhas do sorgo possuem depósito de substância cerosa na junção da bainha com o limbo, o que leva a planta a perder menos água na transpiração, sendo importante para a economia de água, sobretudo em condições de estresse hídrico (Eastin, 1972; Burow et al., 2009). Ainda na epiderme foliar superior

(adaxial) podem-se observar as células buliformes, células característica de Poaceas (família do sorgo), que permanecem cheias de água e podem favorecer o enrolamento foliar (ou seja, são células motoras) em uma tentativa de diminuir a área transpiratória e economizar água (Lino, 2011). Detalhes sobre a anatomia foliar do sorgo podem ser observados na Figura 3.

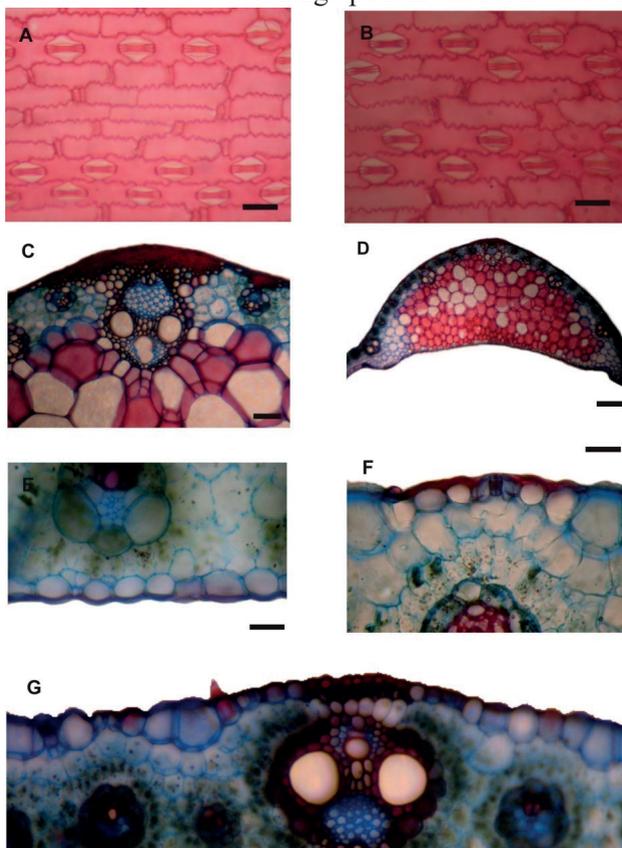


Figura 3. A e B: Fotomicrografias de secções paradermicas da face abaxial e adaxial respectivamente. C: feixe central da nervura central em destaque mostrando com detalhes os feixes vasculares. D: secção de corte transversal da nervura central. E e F: epiderme das faces abaxial e adaxial em cortes transversais, respectivamente. G: mesofilo em corte transversal mostrando o primeiro feixe de maior calibre no mesofilo; após a nervura central, células epidérmicas ordinárias, tricomas, células buliformes, fibras, estômatos e anatomia Kranz. Barras 50 μ (A, B, E, F) 100 μ (C, D, G).

Fonte: Adaptado de Lino (2011).

A inflorescência do sorgo é do tipo panícula com um eixo central conhecido como ráquis de onde partem eixos secundários. Nos eixos há as espiguetas em pares, uma séssil e uma pedicelada. A diferenciação floral do sorgo é afetada pelo fotoperíodo e pela temperatura. O fotoperíodo pode ser definido como a resposta do desenvolvimento à duração dos períodos de luz e escuro. E deve-se lembrar de que o comprimento do dia varia de acordo com a estação do ano e a latitude.

Em sorgo são conhecidos seis genes de maturidade que afetam tempo de floração e a resposta de floração fotoperiódica: *Ma1*, *Ma2*, *Ma3*, *Ma4*, *Ma5* e *Ma6*. Os primeiros quatro genes de maturidade inibem a floração sob condições de dias longos, mas permitem a floração precoce em condições de dia curto. Comparando esse gene *Ma1* em relação aos outros três, ele causa maior sensibilidade às condições de dias longos (Bhosale et al., 2012; Calviño; Messing, 2012).

Os genótipos de sorgo forrageiro, biomassa, vassoura e sacarino são sensíveis ao fotoperíodo, sendo considerados de dias curtos (Silva et al., 2005; Almodares; Mostafafi Darany, 2006; Berenji et al., 2011; Castro et al., 2015), porém existe uma variação à sensibilidade de genótipos de sorgo (alguns são mais e outros menos sensíveis ao fotoperíodo). Além disso, diversos programas de melhoramento buscam obter genótipos insensíveis ao fotoperíodo nesses outros tipos de sorgo. Vale ressaltar que em um cultivo de segunda safra no Brasil, quando o comprimento do dia diminui, os genótipos de sorgo granífero (insensíveis ao fotoperíodo) serão os mais indicados a serem semeados, pois os outros materiais poderão (mas nem sempre) levar a quedas de produtividade em razão do florescimento precoce.

O ciclo do sorgo pode ser dividido em três fases: Vegetativa (EC1), Reprodutiva (EC2) e Período de maturação do grão (EC3) (Figura 4).

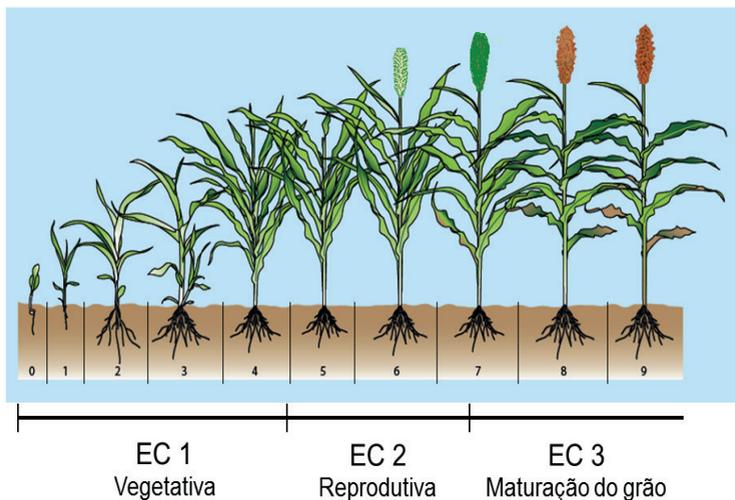


Figura 4. Fases de desenvolvimento do sorgo.

Fonte: Adaptado de Paul (1990).

Durante a primeira fase de crescimento das culturas, que vai do plantio até a iniciação da panícula (EC1), é muito importante a rapidez da germinação, emergência e estabelecimento da plântula, uma vez que a planta é pequena, tem um crescimento inicial lento, e um pobre controle de plantas daninhas nesta fase pode reduzir seriamente o rendimento de grãos. Embora não existam dados concretos disponíveis acerca de como os estádios iniciais da cultura podem afetar o rendimento, é lógico pensar que um bom estande, com rápida formação de folhas e sistema radicular, tornará aquela cultura apta a enfrentar possíveis estresses ambientais durante o seu ciclo (Eastin, 1972).

Os híbridos de maneira geral têm uma formação de folhas e de sistema radicular mais rápida do que linhagens ou variedades. Quando se comparam materiais forrageiros, principalmente variedades, eles são mais lentos que os graníferos (Magalhães et al., 2008).

Na fase seguinte (EC2), que compreende a iniciação da panícula até o florescimento, vários processos de crescimento, se afetados, poderão comprometer o rendimento. São eles: desenvolvimento da área foliar, sistema radicular, acumulação de matéria seca e estabelecimento de um número potencial de sementes. Esse último é provavelmente o mais crítico, desde que maior número de grãos tem sido geralmente o mais importante

componente de produção associado ao aumento de rendimento em sorgo.

Na terceira fase de crescimento (EC3), que vai da floração à maturação fisiológica, os fatores considerados mais importantes são aqueles relacionados ao enchimento de grãos (Doggett, 1970; Eastin, 1972; Paul, 1990; Barnabás et al., 2008; Lopes et al., 2011; Ávila, 2018).

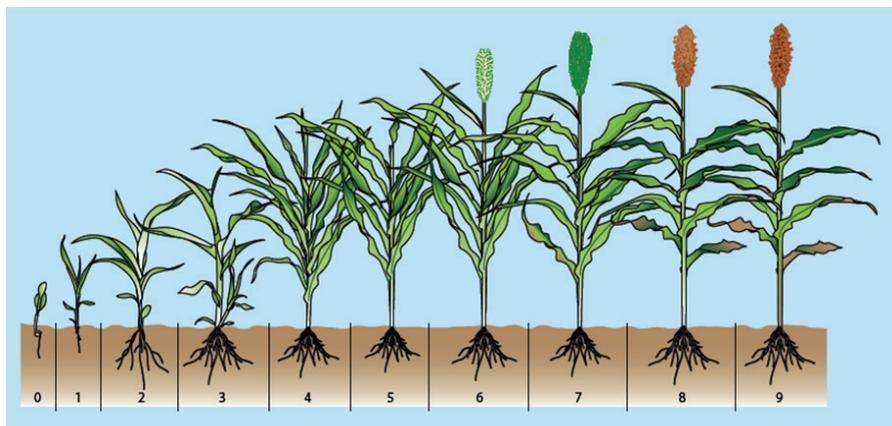
Durante as três etapas de crescimento, a fotossíntese, o particionamento de fotoassimilados e a divisão e expansão celular devem estar ajustados visando um bom rendimento da cultura. É lógico pensar que o rendimento final é função tanto da duração do período de enchimento de grãos como da taxa de acumulação de matéria seca diária (Doggett, 1970).

Estádios de Desenvolvimento do Sorgo

O conhecimento do padrão diferencial de acúmulo de matéria seca e de nutrientes, durante o ciclo da cultura do sorgo, permite avaliar as necessidades de adequadas práticas de manejo.

Durante os primeiros 20 ou 30 dias após a emergência, as plantas crescem lentamente; depois, o crescimento e a acumulação de matéria seca são rápidos e quase lineares, até a maturação fisiológica. Até os 30-40 dias após a emergência, as plantas se constituem praticamente da bainha e da lâmina foliar; e, após este período, começa o alongamento do colmo e o ganho rápido de peso.

A melhor adequação de práticas de manejo da cultura do sorgo está associada aos estádios fenológicos da planta, que variam de acordo com cultivar, condições edafoclimáticas e práticas de manejo. As fases apresentadas a seguir, (Figura 5) representam o desenvolvimento de uma cultivar de sorgo granífero com ciclo de 100 dias, aproximadamente (Vanderlip; Reeves, 1972).



0 – Emergência

1 – Três folhas

2 – Cinco folhas

3 – Oito folhas

4 – Folha bandeira

5 – Emborrachamento

6 – Florescimento

7 – Grão leitoso

8 – Grão duro/pastoso

9 – Maturação fisiológica

Figura 5. Estádios de desenvolvimento do sorgo granífero.

Fonte: Adaptado de Paul (1990).

Estádio 0 (Emergência) – da semente à emergência do coleótilo na superfície do solo, que ocorre, geralmente, dentro de 4 a 10 dias, dependendo das condições ambientais (principalmente umidade, temperatura, oxigênio e qualidade da semente).

Estádio 1 (Visível a lígula/colar ou cartucho da 3ª folha) – ocorre, em condições normais, com cerca de 10 dias após a emergência.

Estádio 2 (Visível a lígula/colar da 5ª folha) – ocorre com três semanas após a emergência.

Estádio 3 (Diferenciação do ponto de crescimento, visível a lígula colar da 8ª folha) – ocorre cerca de 30 dias após a emergência e representa a mudança do ponto de crescimento de vegetativo para reprodutivo. Esta fase é determinada pelas condições do ambiente e pelas características genéticas da cultivar. O período do plantio à diferenciação do ponto de crescimento

é de aproximadamente um terço do período necessário para a maturação fisiológica, ou ciclo da cultura. Neste período inicia o alongamento rápido do colmo, quando aproximadamente 7 a 10 folhas estão completamente desenvolvidas.

Estádio 4 (Visível a última folha denominada de folha bandeira) – ocorre o rápido alongamento do colmo. Todas as folhas estão completamente desenvolvidas, com exceção das últimas três ou quatro.

Estádio 5 (Emborrachamento) – todas as folhas estão completamente desenvolvidas, resultando a máxima área foliar. A panícula alcança seu comprimento máximo, dentro da bainha da folha bandeira.

Estádio 6 (50% de floração) – o período da emergência a 50% de floração (cerca de 60 dias) é de aproximadamente 2/3 do período da emergência à maturação fisiológica.

Estádio 7 (Grão Leitoso) – cerca de 50% da matéria seca dos grãos já foram acumulados (cerca de 70 dias após a emergência), e o peso do colmo diminui.

Estádio 8 (Grão Pastoso) – cerca de ¾ de matéria seca dos grãos já foram acumulados (cerca de 85 dias após a emergência).

Estádio 9 (Maturidade fisiológica) – os grãos estão com 22% a 23% de umidade (cerca de 95 dias após a emergência).

Aspectos Gerais Sobre a Fisiologia do Estresse

As plantas, no decorrer do seu ciclo de vida, estão propensas aos mais variados estresses, seja por variação na temperatura, excesso ou falta de água, salinidade e até mesmo exposição a metais. Dependendo do tipo de estresse, da intensidade, duração, genótipo, estágio de desenvolvimento (Larcher, 2006), os vegetais apresentam respostas morfoanatômicas e fisiológicas que os permitem sobreviver às condições adversas. No entanto, podem ocorrer variações intra e interespecíficas na tolerância das plantas ao estresse, de modo que as modificações em sua morfologia e em seu metabolismo não sejam suficientes para evitar, por exemplo, redução no crescimento e da sua produtividade. Em um cenário de mudanças climáticas

e aumento na demanda por alimentos, existe a preocupação na descoberta de cultivares que sejam capazes de lidar melhor com as condições adversas a que são expostas, sem que sofram grandes perdas em sua produtividade. A seguir, seguem algumas respostas de plantas de sorgo a diferentes condições de estresse.

O Estresse Hídrico na Planta de Sorgo

O estresse hídrico pode ser caracterizado pelo excesso de água (alagamento e/ou encharcamento) ou pela falta de água (seca ou déficit hídrico). O excesso de água pode acontecer por má drenagem do solo, tempestades ou excesso de irrigação. A falta de água é decorrente de estiagens, má distribuição de chuvas, ocorrência de veranicos.

Em um cenário de alterações climáticas, a ocorrência de alagamento tem sido mais frequente em determinadas regiões do globo terrestre, comprometendo a produção de diversas culturas (Hausmann et al., 2012). O estresse pelo alagamento ocorre exatamente em decorrência do excesso de água no solo, que ocupa os poros livres e reduz a disponibilidade de oxigênio, assim como altera o potencial redox e eletroquímico do solo, causando alterações no pH e alterando a disponibilidade de nutrientes e outros elementos presentes no solo (Camargo et al., 1999). Dessa maneira, além das alterações morfofisiológicas em decorrência da falta de oxigênio, podem ocorrer sintomas de falta ou excesso de micronutrientes, tais como manganês e ferro (Shabala, 2011).

Com isso, dependendo das características da cultura, assim como o estágio em que ela é acometida pelo excesso de água e o tempo de estresse, podem ocorrer alterações morfológicas e metabólicas, que podem, inclusive, culminar em menor produção da cultura (Zhang et al., 2016). Em sorgo, o excesso prolongado de água é um problema para o cultivo, principalmente por reduzir a atividade das enzimas antioxidantes, fotossíntese, conteúdo relativo de água e biomassa seca de parte aérea e de raízes, além de influenciar negativamente todos os atributos relacionados à produção de bioetanol (Zhang et al., 2016).

A resposta de plantas ao alagamento depende da atuação de aquaporinas nas raízes para permitirem a entrada de água. Em um estudo acerca da regulação dos genes de aquaporinas em cultivares tolerantes e sensíveis de sorgo verificou-se um padrão de expressão típico do genótipo, do tecido amostrado e do tempo de alagamento. Existiu um padrão de

expressão diferencial de cinco genes nas cultivares tolerantes e, por serem genes relacionados à mitigação do estresse, permitiram maior tolerância dessas cultivares. Segundo os autores, a tolerância de sorgo ao alagamento está muito relacionada à expressão de determinadas famílias de aquaporinas, que exercem papel pivotante na tolerância de sorgo ao alagamento (Kadam et al., 2017).

Nesse sentido, as respostas de redução de trocas gasosas e do conteúdo relativo de água são mais pronunciadas na cultivar sensível, que inclusive também apresenta maior diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar do que a cultivar tolerante. Dessa maneira, os autores confirmaram em sorgo a relação direta entre o status hídrico e as trocas gasosas com a variação da temperatura foliar. Com isso, estabeleceram a diferença de temperatura entre folha e ar como um marcador para determinar a tolerância de cultivares de sorgo ao alagamento, de modo que quanto maior diferença de temperatura, menor a tolerância (Zhang et al., 2019).

Mudanças climáticas estão relacionadas a alterações de disponibilidade hídrica e de temperatura e, por isso, há tendência de que também ocorram mais eventos de seca em determinadas áreas do globo terrestre. A seca é caracterizada pelo déficit hídrico, em que há menor disponibilidade de água para plantas, que culmina em quebra da homeostase celular, menor assimilação de carbono, resultando em menor crescimento e, conseqüentemente, menor produção (Souza et al., 2018).

Assim há necessidade de conhecimento acerca das respostas de cultivares tolerantes a esse estresse para utilizar em programas de melhoramento genético (Fracasso et al., 2016). Neste sentido, estudos realizados com linhagens de acesso permitiu a seleção de genótipos com maior tolerância ao déficit hídrico para serem cultivadas em território africano. A característica marcante dessas plantas selecionadas é a manutenção de um conteúdo relativo de água superior a 80%. Assim, plantas que possuíam mecanismos para manutenção do status hídrico apresentaram boa performance sob déficit hídrico, inclusive após a reidratação (Devnarain et al., 2016).

O sorgo possui maior tolerância ao déficit hídrico do que outras culturas de cereais, o que permite o seu plantio em regiões sujeitas à escassez hídrica (Devnarain et al., 2016). As estratégias de tolerância ao déficit hídrico variam entre os genótipos estudados. O genótipo tido como o mais tolerante apresentou maior produção de biomassa e maior índice de tolerância, menor

quantidade de fração transpirável de água do solo e elevada capacidade de recuperar o aparato foliar depois do estresse hídrico (Fracasso et al., 2016).

A seca tem efeitos sobre as plantas de sorgo pela indução de senescência prematura das folhas, que contribui para a menor produtividade dessas plantas. O déficit hídrico causa redução no N foliar, de modo que ocorre desbalanço entre C/N nas folhas maduras, induzindo senescência foliar (Chen et al., 2015). As folhas senescentes geralmente apresentam sintomas de decréscimo na fotossíntese, na eficiência fotoquímica do fotossistema II e no conteúdo de clorofila, além de expressão diferencial dos genes marcadores de senescência (Chen et al., 2015).

O aumento na relação C/N é um fator que controla o processo de senescência em plantas sob déficit hídrico. Isso foi comprovado pelo fato de que a aplicação exógena de açúcar combinada com quantidade limitada de nitrogênio promoveu a senescência foliar desencadeada pela seca (Chen et al., 2015).

Em genótipos com característica “Stay Green” sob déficit hídrico observou-se um processo de remobilização de açúcar do caule para os pedúnculos, ainda que a assimilação de carbono estivesse reduzida nas folhas fontes. Os fluxos de açúcar foram acompanhados por alterações nas atividades das enzimas do metabolismo de açúcar, assim como na expressão dos genes relacionados ao metabolismo e ao transporte de açúcares. Essa alteração do metabolismo do carboidrato está relacionada com a característica “Stay Green” (Ghate et al., 2017). Além disso, existe maior expressão de um gene relacionado à síntese de prolina no “Stay green”, cujo *locus* e promotor foram identificados (Johnson et al., 2015). Dessa maneira, verifica-se que o retardo da senescência em genótipos “Stay Green” parece estar relacionado com a alteração do metabolismo dos carboidratos, juntamente com a produção de osmólitos compatíveis, que permitem a manutenção do status hídrico do vegetal.

Conforme mencionado anteriormente no texto, a resposta ao estresse depende de vários fatores e, portanto, a resposta pode ser diferenciada, dependendo das condições a que as plantas estão submetidas (Ogbaga et al., 2014). Inclusive plantas de sorgo bem próximas filogeneticamente entre si apresentam padrão de recuperação diferenciado após o déficit hídrico (Ogbaga; Stepien, 2015).

Há relatos de que a imposição de déficit hídrico severo por um período curto aumentou a produção de grãos em relação às plantas irrigadas.

A maior produção foi acompanhada de maior peso médio de grãos, número de grãos por panícula e índice de colheita. Essas plantas apresentaram maior razão parte aérea/raiz, demonstrando a alteração do particionamento de carboidratos, com maior investimento em parte aérea do que em raízes (Adams; Erickson, 2017).

Cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico apresentam constitutivamente maior concentração de açúcares solúveis, permitindo a manutenção da transpiração e da fotossíntese até mesmo em condições de seca extrema (Ogbaga et al., 2014). Além disso, existe uma relação direta entre a produção de osmólitos compatíveis, tais como açúcares e álcoois de açúcares, com a tolerância ao déficit hídrico, que é liderada pela eficiência no sequestro de espécies reativas de oxigênio (EROs) e manutenção prolongada das funções foliares (Ogbaga et al., 2016; Nxele et al., 2017).

Por outro lado, a seca progressiva reduziu significativamente o crescimento e o desenvolvimento do sorgo pela modulação diferenciada de várias respostas bioquímicas, relacionadas principalmente ao aumento nos danos celulares. O aumento nos danos causados pela elevada geração de EROs culminou em extensivos danos celulares ligados à redução na biomassa das plantas (Nxele et al., 2017).

Embora haja uma tolerância inerente do sorgo ao déficit hídrico, atualmente existem esforços em busca de alternativas para mitigação do estresse nessa cultura, buscando menores perdas de produção. Recentemente, a aplicação de nanopartículas de óxido de zinco e de óxido de cério no solo mitigou os efeitos da seca sobre o sorgo, acelerando o crescimento e promovendo aumento na produção das plantas (Djanaguiraman et al., 2018; Dimkpa et al., 2019). A inoculação com *Bacillus cereus*, juntamente com a suplementação foliar com silicato de potássio em plantas de sorgo, aumentou o crescimento vegetativo, conteúdo relativo de água e o conteúdo de prolina. Com isso, as plantas apresentaram maior conteúdo de pigmentos fotossintéticos, maior potencial osmótico e maior absorção de nutrientes (Saad; Abo-Koura, 2018). Além disso, a aplicação foliar de nitrato de potássio, assim como a suplementação das plantas com silício, promoveu a tolerância de plantas de sorgo ao déficit hídrico no estágio pré-florescimento (Ávila, 2018). Características comuns dessas plantas são maior absorção de nutrientes, maior status hídrico e trocas gasosas mais elevadas, culminando em maior produção.

O Estresse por Temperatura na Planta de Sorgo

O estresse por temperatura em plantas pode ocorrer por elevadas temperaturas (calor), baixas temperaturas (frio) ou temperaturas de congelamento (Souza, 2017). Atualmente, a ocorrência desses extremos de temperatura possui influência negativa sobre os processos reprodutivos das plantas (florescimento e polinização), causando danos sobre a produção das culturas (Hatfield; Prueger, 2015). O estresse por frio em regiões tropicais é diferente de regiões temperadas. Nestas, o resfriamento ocorre de forma progressiva enquanto que nas regiões tropicais o resfriamento pode acontecer de forma abrupta após um dia quente (25 °C a 35 °C) e ensolarado (Taiz; Zeiger, 2004). Plantas adaptadas a regiões tropicais são mais sensíveis ao frio do que outras plantas de regiões temperadas (Aroca et al., 2001). Em regiões tropicais, a ocorrência da geada é caracterizada pelo frio, sendo que a camada de gelo formada na superfície foliar pode causar até mesmo ruptura das células, com queima das folhas e perda de área foliar, o que afeta negativamente a produção das plantas.

A ocorrência de temperaturas muito baixas (menor que 16 °C) durante os estágios reprodutivos leva à abscisão floral, diminuição da sincronia floral, anormalidades morfológicas florais, abortamento de óvulos, esterilidade do pólen e redução do enchimento de grãos (Bechoux et al., 2000; Thakur et al., 2010). As respostas das plantas ao estresse por altas temperaturas dependem do grau de temperatura do ar, duração e tipo de planta. O estresse por calor leva a diversas alterações na germinação, no crescimento e desenvolvimento, na reprodução e no rendimento de grãos nas plantas (Cichino et al., 2010). O estresse por elevadas temperaturas está relacionado à menor estabilidade das membranas celulares e de diversas proteínas, o que afeta a estrutura e a homeostase celulares, causando desequilíbrio metabólico e até mesmo morte celular (Mittler et al., 2012; Parrotta et al., 2016).

O cenário atual de mudanças climáticas é marcado também pelo aumento na temperatura global do planeta, o que pode causar danos à produtividade das culturas. Uma das consequências do aumento na temperatura é a desnaturação de enzimas, que perdem sua função, causando alterações metabólicas das plantas. Em contrapartida, em determinadas áreas do planeta, as plantações podem ser submetidas a temperaturas muito baixas, o que também causa alterações nas membranas celulares, eleva a formação de radicais e causa danos celulares (Guo et al., 2016). Em ambos os casos, seja de baixas ou elevadas temperaturas, os danos celulares decorrentes da

condição de estresse podem levar a alterações metabólicas, que culminarão em menor crescimento da planta e perdas na produtividade.

No caso do sorgo, a temperatura máxima tolerável, sem que haja maiores danos à produtividade, é de 37 °C (Prasad et al., 2015). Na Austrália, os materiais costumam ser tolerantes a até 36 °C (Singh et al., 2017b), porém, nos Estados Unidos, pesquisas mostram que a tolerância é reduzida a partir de 33 °C (Tack et al., 2017), quando já começam a ocorrer perdas na produtividade. Visando reduzir os efeitos das elevadas temperaturas sobre a cultura do sorgo, existem esforços de produtores em alterar a janela de plantio em alguns dias, porém ainda ocorrem perdas consideráveis. Dessa maneira, estudos têm sugerido a necessidade do desenvolvimento de cultivares que sejam mais tolerantes às elevadas temperaturas, principalmente em um cenário de aquecimento global, em que há previsões de 10% de queda na produção de sorgo em resposta ao aumento de cada 1 °C. Nesse sentido, a sugestão é que sejam utilizadas linhagens selvagens e mais robustas, que forneçam novos traços relacionados à adaptação às temperaturas máximas mais elevadas durante o florescimento, que possam ser utilizados em programas de melhoramento genético. Com isso, permitindo maior produção de sorgo sob cenário de alterações climáticas (Tack et al., 2017).

A suscetibilidade do sorgo no período reprodutivo é maior quando a elevação da temperatura ocorre entre 10 dias antes até cinco dias após a antese, ainda que por um curto período de duração. Nesse estágio, a elevação da temperatura causa redução na fertilidade das espiguetas e ausência de grãos. No entanto, quando o estresse é aplicado no início da emergência da panícula ou início do enchimento de grãos, causa decréscimo na fertilidade da espiguetas e no peso individual dos grãos (Prasad et al., 2015). O decréscimo na produção de sorgo pode ocorrer tanto sob elevadas ou baixas temperaturas. Isso é decorrente da suscetibilidade do grão de pólen à variação de temperatura, uma vez que há maior propensão à ocorrência de processos oxidativos, reduzindo a viabilidade do grão de pólen e, conseqüentemente, a produção de sementes (Djanaguiraman et al., 2018).

A tolerância de plântulas de sorgo sob elevadas temperaturas foi relacionada à maior produção de ácidos graxos insaturados para compor as membranas celulares, juntamente com melhor defesa do sistema antioxidante. Com isso, houve menor geração de espécies reativas de oxigênio e menores danos celulares nas plântulas com maior tolerância. Essas plântulas também apresentaram menores danos aos fotossistemas (menor decréscimo na

eficiência do fotossistema II - Fv/Fm) (Guo et al., 2016). Recentemente, foi verificada a existência em sorgo de uma proteína membro da família GRBP, denominada SbGRBP, que é rica em fragmentos de glicina. Esta proteína está presente no núcleo e no citosol e é modulada por Ca^{+2} /calmodulina em resposta às elevadas temperaturas, provavelmente contribuindo para a termotolerância de plantas de sorgo (Singh et al., 2017a).

A ocorrência do frio reduziu significativamente a assimilação de CO_2 e foram encontradas regiões do genoma que estivessem relacionadas com, pelo menos, uma variação nas plantas sob as condições de cultivo. Foram encontrados marcadores relacionados aos traços de fluorescência da clorofila e de assimilação de carbono (fotossíntese) em diferentes cromossomos. Finalmente, nessas regiões foram encontrados genes candidatos relacionados a carotenoides, fitormônios, tiorredoxina, componentes do fotossistema II e antioxidantes. Essas descobertas contribuirão para o processo de melhoramento de sorgo para tolerância ao frio (Ortiz et al., 2017).

Em razão da suscetibilidade do sorgo às variações de temperatura, estudos vêm sendo realizados para acesso a bancos de germoplasma para encontrar pontos de variação do genoma que auxiliem em programas de melhoramento dessa cultura para adaptação em regiões sujeitas a temperaturas extremas. Em plântulas, foi observada extensiva variação nas respostas às baixas e às elevadas temperaturas entre os acessos do germoplasma testados. Grande parte dos genes que eram relacionados à síntese de antocianinas e de carboidratos solúveis totais foram encontrados nos testes de plântulas sob estresse por frio. Outros que foram relacionados à síntese de açúcares e das vias de transporte de íons foram verificados em plântulas sob estresse por calor. Esse conhecimento contribuirá para o desenvolvimento de linhagens resistentes às variações de temperatura, assim como para caracterização de genes relacionados à tolerância à variação de temperatura (Chopra et al., 2017).

Experimentos em campo e condições controladas com plântulas de sorgo sob baixas temperaturas, com fenotipagem e caracterização por marcadores, identificaram prováveis regiões de cromossomos ligadas à tolerância ao frio. Após os ensaios de campo e a realização de QTL, foram encontrados prováveis genes relacionados à tolerância de plântulas de sorgo ao frio, que lhes permite crescer e se desenvolver (Parra-Londono et al., 2018).

Visando estratégias de mitigação dos efeitos negativos da elevada

temperatura, realizou-se a aplicação de extratos de moringa (*Moringa oleifera*) 3% por *priming* de sementes e/ou aplicação foliar. O extrato de moringa melhorou os parâmetros de crescimento e o conteúdo de clorofila, levando as plantas à maior produção forrageira, além da maior produção de biomassa seca (Ahmad et al., 2016). A aplicação foliar de nanopartículas de selênio em plantas de sorgo sob elevadas temperaturas cresceu a atividade das enzimas antioxidantes e reduziu a quantidade de agentes oxidantes, além de ter aumentado a quantidade de fosfolipídeos insaturados nas membranas celulares. Com isso, possibilitou maior porcentagem de germinação dos grãos de pólen, o que levou à maior produção das plantas (Djanaguiraman et al., 2018).

O Estresse Salino na Planta de Sorgo

O estresse salino ocorre geralmente nas regiões áridas e semiáridas, assim como naquelas áreas que dependem da irrigação. A salinidade depende das características do solo, do manejo da irrigação e do solo, da qualidade da água e das condições climáticas (Prisco; Gomes-Filho, 2010).

A resposta à salinidade está relacionada a uma variedade de alterações fisiológicas relacionadas ao estresse osmótico, desbalanço iônico e desbalanço nutricional (Zörb et al., 2019). Inicialmente há o estresse osmótico, em que a queda no potencial osmótico externo impede a absorção de água pelas raízes e, em seguida, ocorre a toxicidade em resposta ao excesso de íons Na^+ absorvidos. Essa alteração na disponibilidade de íons por causa da salinidade também altera a absorção de nutrientes, causando desbalanço nutricional (Zörb et al., 2019).

O sorgo tem apresentado redução de crescimento da planta e do alongamento foliar, acúmulo de íons tóxicos e solutos orgânicos, assim como decréscimo na concentração de K^+ nas folhas. Essas alterações são mais acentuadas em plantas de genótipos sensíveis à salinidade (Lacerda et al., 2003). No que se refere à capacidade de recuperação pós-estresse, o particionamento do carbono, as alterações na absorção, transporte e realocação de sais parecem ser mais importantes para a sobrevivência das plantas do que o acúmulo de solutos orgânicos em folhas (Lacerda et al., 2005).

Existe uma variação entre as cultivares de sorgo para a tolerância à salinidade, que reflete diretamente na produção de grãos dessas cultivares sob condições de estresse salino (Hassanein et al., 2010). Estudos de

screening para determinação da tolerância de sorgo à salinidade têm sido realizados visando a indicação das cultivares mais indicadas para cultivo em áreas sujeitas à salinidade (Hassanein et al., 2010). Dessa maneira, cultivares tolerantes à salinidade estão sendo plantadas em regiões com solos salinos, onde vêm apresentando grande potencial para a produção de bioetanol quando cultivadas sob salinidade moderada (Vasilakoglou et al., 2011). As características apresentadas pelas cultivares mais tolerantes estão relacionadas ao maior crescimento e à maior produção de biomassa em relação às cultivares mais sensíveis. Isso pode se dever ao fato de que as plantas que apresentam determinada tolerância às condições de estresse podem apresentar modificações morfoanatômicas e metabólicas que as permitam lidar com o estresse sem elevado investimento em energia, de modo que haja perdas mínimas no crescimento em relação às plantas sensíveis.

Diante das variações na tolerância à salinidade, esforços vêm sendo realizados no sentido de aumento da tolerância de sorgo à salinidade. Com isso, estão ocorrendo estudos relacionados à aplicação de substâncias visando à mitigação do estresse, assim como a identificação de genes de tolerância à salinidade para programas de melhoramento genético do sorgo. Um estudo transcriptômico mostrou que há diferença na expressão de genes de regulação transcricional, transdução de sinais e metabolismo secundário entre as cultivares sensível e tolerante, principalmente receptores de quinases e fatores de transcrição (Cui et al., 2018). Em outro estudo com cultivares com tolerância contrastante à salinidade verificou-se que os genes diferencialmente expressos entre as duas cultivares eram aqueles do metabolismo do carbono. Na cultivar tolerante ocorreu aumento de genes que codificam enzima NADP⁺ málica e sintase da sacarose, enquanto houve redução dos genes de invertase. Além disso, os genes relacionados à estrutura dos fotossistemas e ao transporte de elétrons foram menos alterados na cultivar tolerante (Sui et al., 2015).

Um estudo desenvolvido com *Sorghum bicolor*, que apresenta tolerância à salinidade, mostrou que os genes induzidos pela salinidade eram relacionados à fotossíntese, metabolismo de energia (carboidratos, lipídeos, aminoácidos, coenzimas e íons), síntese ou manutenção de constituintes da parede e da membrana celulares, transdução de sinais, regulação transcricional e canais de água (Dai et al., 2016).

Uma vez que os genes ligados à tolerância tenham sido identificados, existem processos mais prolongados para o melhoramento de sorgo para

tolerância à salinidade, no entanto, são processos mais onerosos e demorados para o resultado final. Nesse sentido, também existem pesquisadores voltados para a descoberta de produtos que sejam capazes de mitigar o efeito da salinidade sobre o sorgo.

O silício é capaz de promover a tolerância de plantas de sorgo à salinidade pela redução do estresse osmótico e iônico (Yin et al., 2013). A aplicação de silício comprovadamente reduz a absorção de íons Na^+ e promove a tolerância de plantas à salinidade pela deposição nas raízes, impedindo a absorção de sal pelas raízes (Guo et al., 2016). Além disso, Si também alivia os danos causados à condutividade hidráulica das raízes pela maior expressão e atividade das aquaporinas, mantendo as trocas gasosas e reduzindo o estresse osmótico (Liu et al., 2015).

A aplicação da mistura dos extratos de substâncias húmicas e de moringa também é capaz de mitigar os efeitos da salinidade sobre plantas de sorgo. Isso se deveu à promoção do crescimento e da atividade fotoquímica dessas plantas, além de aumentar a produção de hormônios vegetais e de osmoprotetores, aumentando a atividade do sistema antioxidante em relação às plantas não tratadas (Desoky et al., 2018). Hormônios vegetais, tais como giberelinas, citocininas e ácido salicílico, atuam na promoção da tolerância à salinidade. A atuação desses fitormônios está geralmente relacionada à modulação no balanço hormonal que controla as respostas das plantas à salinidade (Nimir et al., 2015, 2017; Forghani et al., 2018; Zhu et al., 2019). Enquanto giberelinas e citocininas estão mais relacionadas com a promoção das trocas gasosas, o ácido salicílico reduz a permeabilidade da membrana celular e o conteúdo de Na^+ , reduzindo o estresse iônico das plantas sob salinidade (Nimir et al., 2015). Além disso, priming de sementes com a concentração adequada desses mesmos hormônios promove a germinação, o crescimento inicial e a atividade do sistema antioxidante de plântulas de sorgo sob salinidade e elevadas temperaturas (Nimir et al., 2015; Zhu et al., 2019).

O Estresse por Metais na Planta de Sorgo

Conforme apresentado anteriormente, existem variações nas respostas de plantas de sorgo a alagamento, temperaturas extremas, salinidade e déficit hídrico. Finalmente, também existem relatos de utilização do sorgo em áreas com elevadas concentrações de metais, seja visando ampliação do cultivo em áreas consideradas marginais (Dhawi et al., 2016), ou seja, pretendendo a

fitorremediação em áreas contaminadas (Jia et al., 2016; Naeini; Rad, 2018). Neste sentido, surge o questionamento acerca da utilização de cereais para revegetação de áreas de rejeitos contaminados (Sharma; Nagpal, 2018), considerando que a absorção do metal vai depender da concentração do metal no meio, da espécie utilizada e do tecido analisado (Bashmakov et al., 2017).

Estudos vêm sendo realizados na busca de cereais que sejam cultivados em locais propensos à biodisponibilidade de metais (Vamerali et al., 2010), cuja característica mais desejada é a menor taxa de translocação do metal para a parte aérea. Por outro lado, os casos de elevada translocação de metais na parte aérea dos cereais acaba sendo uma resposta interessante para programa de fitorremediação, em que há correta destinação dessas plantas para garantir a retirada dos metais do ambiente por meio de processamento da biomassa (Raskin et al., 1997). Nesses casos, a biomassa das plantas poderá, por exemplo, ser utilizada para a geração de biocombustíveis (Rizwan et al., 2017; Zuo et al., 2019).

No caso do sorgo, a espécie é tolerante ao excesso de níquel e manganês, sendo o excesso do metal mantido nas raízes (Serme et al., 2015; Naeini; Rad, 2018). Ademais, em concentrações moderadas de cádmio, plantas de sorgo absorvem o metal sem que haja prejuízos ao seu crescimento (Jia et al., 2016). Essa tolerância ao cádmio, juntamente com a elevada produção de biomassa, possibilitou a consideração do cultivo de sorgo para produção de bioetanol em áreas contaminadas com cádmio (Tian et al., 2015). A performance das plantas de sorgo também não foi alterada pela presença de cromo no substrato de cultivo, demonstrando a tolerância da espécie ao metal (Padmapriya et al., 2016). Essa espécie também pode ser cultivada em áreas sujeitas à contaminação por céσιο e estrôncio, uma vez que acumula esses metais principalmente em sua parte aérea (Wang et al., 2017a, 2017b).

O desempenho das plantas de sorgo pode ser melhorado pelo uso de técnicas que mitiguem os efeitos dos metais pesados nessas plantas. Experimentos conduzidos em casa de vegetação mostram que a inoculação com micorrizas e com bactérias promotoras de crescimento resistentes a metais favorece o crescimento e desenvolvimento de sorgo cultivado em solos marginais (Dhawi et al., 2016; El-Meihy et al., 2019). Isso ocorre exatamente porque esses microrganismos mitigam o efeito negativo dos metais pesados sobre as plantas, que sobrevivem a essas condições com maior capacidade de bioacumulação de metais (El-Meihy et al., 2019). Em campo, a aplicação

de lodo de esgoto ao solo compactado melhorou as características do solo, permitindo maior absorção de metais juntamente com melhor performance das plantas de sorgo (Zuo et al., 2019). Inclusive a utilização de lodo de esgoto municipal foi apontada como propulsora de maior acúmulo de biomassa em sorgo, favorecendo a utilização dessas plantas para produção de biocombustíveis (Kołodziej et al., 2015).

Referências

ADAMS, C. B.; ERICKSON, J. E. Yield enhancement by short-term imposition of severe water deficit in the vegetative growth stage of grain sorghum. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 203, n. 4, p. 309-314, 2017.

AHMAD, W.; NOOR, M. A.; AFZAL, I.; BAKHTAVAR, M. A.; NAWAZ, M. M.; SUN, X.; ZHOU, B.; MA, W.; ZHAO, M. Improvement of sorghum crop through exogenous application of natural growth-promoting substances under a changing climate. **Sustainability**, v. 8, n. 12, article 1330, 2016.

ALMODARES, A.; MOSTAFABI DARANY, S. M. Effects of planting date and time of nitrogen application on yield and sugar content of sweet sorghum. **Journal of Environmental Biology**, v. 27, n. 3, p. 601-605, 2006.

AROCA, R.; TOGNONI, F.; IRIGOYEN, J. J.; SANCHEZ-DIAS, M.; PARDOSSI, A. Different root low temperature response of two maize genotypes differing in chilling sensitivity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 39, n. 12, p. 1067-1073, 2001.

ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S. A. Phenotypic changes in grain sorghum over the last five decades. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 197, n. 4, p. 249-257, 2011.

ÁVILA, R. **Indução de tolerância à seca em sorgo cultivado sob déficit hídrico e suplementada com silício e nitrato de potássio no pré-florescimento**. 2018. 123 p. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

BARNABÁS, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 1, p. 11-38, 2008.

BASHMAKOV, D. I.; KLUCHAGINA, A. N.; MALEC, P.; STRZATKA, K.; LUKATKIN, A. S. Lead accumulation and distribution in maize seedlings: relevance to biomass production and metal phytoextraction. **International Journal of Phytoremediation**, v. 19, n. 11, article 6514, 2017.

BECHOUX, N.; BERNIER, G.; LEJEUNE, P. Environmental effects on the early stages of tassel morphogenesis in maize (*Zea mays* L.). **Plant, Cell and Environment**, v. 23, n. 1, p. 91-98, 2000.

BENNETT, W.; TUCKER, B.; MAUNDER, A. **Modern grain sorghum production**. Iowa: Iowa State University Press, 1990.

BERENJI, J.; DAHLBERG, J.; SIKORA, V.; DRAGANA, L. Origin, history, morphology, production, improvement, and utilization of broomcorn [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] in Serbia. **Economic Botany**, v. 65, n. 2, p. 190-208, 2011.

BHOSALE, S. U.; STICH, B.; RATTUNDE, H. F. W.; WELTZIEN, E.; HAUSSMANN, B. I. G.; HASH, C. T.; RAMU, P.; CUEVAS, H. E.; PATERSON, A. H.; MELCHINGER, A. E.; PARZIES, H. K. Association analysis of photoperiodic flowering time genes in west and central African sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **BMC Plant Biology**, v. 12, article 32, 2012.

BIBI, A.; SADAQAT, H. A.; AKRAM, H. M.; MOHAMMED, M. I. Physiological markers for screening sorghum (*Sorghum bicolor*) germplasm under water stress condition. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 12, n. 3, p. 451-455, 2010.

BORÉM, A.; PIMENTEL, I.; PARRELA, R. A. C. (ed.). **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. 275 p.

BUROW, G. B.; FRANKS, C. D.; ACOSTA-MARTINEZ, V.; XIN, Z. Molecular mapping and characterization of BLMC, a locus for profuse wax (bloom) and enhanced cuticular features of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.). **Theoretical Applied Genetics**, v. 118, p. 423-431, 2009.

CALVIÑO, M.; MESSING, J. Sweet sorghum as a model system for bioenergy crops. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, n. 3, p. 323-329, 2012.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.

CASTRO, F. M. R.; BRUZI, A. T.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; LOMBARDI, G. M. R.; ALBUQUERQUE, C. J. A.; LOPES, M. Agronomic and energetic potential of biomass sorghum genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 6, p. 1862-1873, 2015.

CHEN, D.; WANG, S.; XIONG, B.; CAO, B.; DENG, X. Carbon/nitrogen imbalance associated with drought-induced leaf senescence in sorghum bicolor. **PLoS One**, v. 10, n. 8, e0137026, 2015.

CHOPRA, R.; BUROW, G.; BURKE, J. J.; GLADMAN, N.; XIN, Z. Genome-wide association analysis of seedling traits in diverse sorghum germplasm under thermal stress. **BMC Plant Biology**, v. 17, article 12, 2017.

CICHINO, M.; RATTALINO EDREIRA, J.; URIBELANEA, M.; OTEGUI, M. Heat stress in field-grown maize: response of physiological determinants of grain yield. **Crop Science**, v. 50, n. 4, p. 1438-1448, 2010.

CLERGET, B.; DINGKUHN, M.; GOZÉ, E.; RATUNDE, H. F. W.; NEY, B. Variability of phyllochron, plastochron and rate of increase in height in photoperiod-sensitive Sorghum varieties. **Annals of Botany**, v. 101, n. 4, p. 579-594, 2008.

CUI, J.; REN, G.; QIAO, H.; XIANG, X.; LUANG, L.; CHANG, J. Comparative transcriptome analysis of seedling stage of two sorghum cultivars under salt stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, p. 986-998, 2018.

DAI, L. Y.; DE YIN, K.; ZHANG, Y. X.; YU, C. Q. Screening and analysis of soda saline-alkali stress induced up-regulated genes in sugar sorghum. **Maydica**, v. 61, p. 1-9, 2016.

DESOKY, E. S. M.; MERWAD, A. R. M.; RADY, M. M. Natural biostimulants improve saline soil characteristics and salt stressed-sorghum performance. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 8, p. 967-983, 2018.

DEVNARAIN, N.; CRAMPTON, B. G.; CHIKWAMBA, R.; BECKER, J. V. W.; O'KENNEDY, M. M. Physiological responses of selected African sorghum landraces to progressive water stress and re-watering. **South African Journal of Botany**, v. 103, p. 61-69, 2016.

DHAWI, F.; DATTA, R.; RAMAKRISHNA, W. Mycorrhiza and heavy metal resistant bacteria enhance growth, nutrient uptake and alter metabolic profile of sorghum grown in marginal soil. **Chemosphere**, v. 157, p. 33-41, 2016.

DIMKPA, C. O.; SINGH, U.; BINDRABAN, P. S.; ELMER, W. H.; GARDEA-TORRESDEY, J. L.; WHITE, J. C. Zinc oxide nanoparticles alleviate drought-induced alterations in sorghum performance, nutrient acquisition, and grain fortification. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 926-934, 2019.

DJANAGUIRAMAN, M.; PERUMAL, R.; JAGADISH, S. V. K.; CIAMPITTI, I. A.; WELTI, R.; PRASAD, P. V. V. Sensitivity of sorghum pollen and pistil to high-temperature stress. **Plant Cell and Environment**, v. 41, n. 5, p. 1065-1082, 2018.

DOGGETT, H. (ed.). **Sorghum**. 2 ed. London: Longman, 1988.

DOGGETT, H. Physiology and agronomy. In: DOGGETT, H. (ed.). **Sorghum**. London: Longman, 1970. p. 180-211.

EASTIN, J. Photosynthesis and translocation in relation to plant development. In: RAO, N.; HOUSE, L. (ed.). **Sorghum in seventies**. New Delhi: Oxford & IBH, 1972. p. 214-246.

EL-MEIHY, R. M.; ABOU-ALY, H. E.; YOUSSEF, A. M.; TEWFIKE, T. A.; EL-ALKSHAR, E. A. Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 295-301, 2019.

FORGHANI, A. H.; ALMODARES, A.; EHSANPOUR, A. A. Potential objectives for gibberellic acid and paclobutrazol under salt stress in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench cv. Sofra). **Applied Biological Chemistry**, v. 61, p. 113-124, 2018.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. **Manual da cultura do sorgo**. Jaboticabal: FUNEP, 2009.

FRACASSO, A.; TRINDADE, L. M.; AMADUCCI, S. Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE. **BMC Plant Biology**, v. 16, article 115, 2016.

GHATE, T.; DESHPANDE, S.; BHARGAVA, S. Accumulation of stem sugar and its remobilisation in response to drought stress in a sweet sorghum genotype and its near-isogenic lines carrying different stay-green loci. **Plant Biology**, v. 19, n. 3, p. 396-405, 2017.

GUO, Y.; LIU, S.; YANG, Z.; TIAN, S.; SUI, N. Responses of unsaturated fatty acid in membrane lipid and antioxidant enzymes to chilling stress in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) seedling. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 9, p. 71-83, 2016.

HASSANEIN, M. S.; AHMED, A. G.; ZAKI, N. M. Growth and productivity of some sorghum cultivars under saline soil condition. **Journal of Applied Science Research**, v. 6, n. 11, p. 1603-1611, 2010.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4-10, 2015.

HAUSSMANN, B. I. G.; FRED RATTUNDE, H.; WELTZIEN-RATTUNDE, E.; TRAORÉ, P. S. C.; BROCKE, K. V.; PARZIES, H. K. Breeding strategies for adaptation of pearl millet and sorghum to climate variability and change in West Africa. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, n. 5, p. 327-339, 2012.

JIA, W.; LV, S.; FENG, J.; LI, J.; LI, X.; LI, S. Morphophysiological characteristic analysis demonstrated the potential of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) in the phytoremediation of cadmium-contaminated soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 18823-18831, 2016.

JOHNSON, S. M.; CUMMINS, I.; LIM, F. L.; SLABAS, A. R.; KNIGHT, M. R. Transcriptomic analysis comparing stay-green and senescent Sorghum bicolor lines identifies a role for proline biosynthesis in the stay-green trait. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 22, p. 7061-7073, 2015.

KADAM, S.; ABRIL, A.; DHANAPAL, A. P.; KOESTER, R. P.; VERMERRIS, W.; JOSE, S.; FRITSCHI, F. B. Characterization and regulation of aquaporin genes of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) moench] in response to waterlogging stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 862, 2017.

KOŁODZIEJ, B.; ANTONKIEWICZ, J.; STACHYRA, M.; BIELINSKA, E, J.; WISNIEWSKI, J.; LUCHOWSKA, K.; KWIATKOWSKI, C. Use of sewage sludge in bioenergy production: a case study on the effects on sorghum biomass production. **European Journal of Agronomy**, v. 69, p. 63-74, 2015.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M. A.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 49, n. 2, p. 107-120, 2003.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; OLIVA, M. A.; RUIZ, H. A. Changes in growth and in solute concentrations in sorghum leaves and roots during salt stress recovery. **Environmental and Experimental Botany**, v. 54, n. 1, p. 69-76, 2005.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 3. ed. São Carlos: RiMA, 2006.

LINO, L. de O. **Características anatômicas e fisiológicas de genótipos de sorgo contrastantes para tolerância à seca**. 2011. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in sorghum bicolor L. **Environmetnal and Experimental Botany**, v. 111, p. 42-51, 2015.

LOPES, M. S.; ARAUS, J. L.; VAN HEERDEN, P. D. R.; FOYER, C. H. Enhancing drought tolerance in C 4 crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 9, p. 3135-3153, 2011.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. de; MAY, A.; LIMA FILHO, O. F. de; SANTOS, F. C. dos; MOREIRA, J. A. A.; LEITE, C. E. do P.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; FREITAS, R. S. de. Exigências edafoclimáticas e fisiologia da produção. In: BOREM, A.; PIMENTEL, L. D.; PARRELLA, R. A. da C. (ed.). **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. p. 58-88.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. Ecofisiologia. In: RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Cultivo do sorgo**. 4. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 2).

MITTLER, R.; FINKA, A.; GOLOUBINOFF, P. How do plants feel the heat? **Trends in Biochemical Sciences**, v. 37, n. 3, p. 118-125, 2012.

MONTEIRO, M. C. D.; ANUNCIAÇÃO FILHO, C. J.; TABOSA, J. N.; OLIVEIRA, F. J. de; REIS, O. V. dos; BASTOS, G. Q. Avaliação do desempenho de sorgo forrageiro para o semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 3, n. 1, p. 52-61, 2004.

NAEINI, J.; RAD, M. Y. Phytoremediation capability of nickel and manganese polluted soil by *Sorghum bicolor* L. **Iranian Journal of Plant Physiology**, v. 8, n. 3, p. 2427-2435, 2018.

NIMIR, N.; NIMIR, A.; SHIYAN, L.; GUI SHENG, Z.; WENSHAN, G.; BAOLUO, M.; YONGHUI, W. Comparative effects of gibberellic acid, kinetin and salicylic acid on emergence, seedling growth and the antioxidant defence system of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) under salinity and temperature stresses. **Crop Pasture Science**, v. 62, n. 2, p. 145-157, 2015.

NIMIR, N.; ZHOU, G.; GUO, W.; MA, B.; LU, S.; WANG, Y. Effect of foliar application of GA₃, kinetin, and salicylic acid on ions content, membrane permeability, and photosynthesis under salt stress of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 97, n. 3, p. 525-535, 2017.

NXELE, X.; KLEIN, A.; NDIMBA, B. K. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. **South African Journal of Botany**, v. 108, p. 261-266, 2017.

OGBAGA, C.; STEPIEN, P. Recovery after drought in two sorghum cultivars with differing drought tolerance. **Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu**, v. 112, n. 611, p. 41-52, 2015.

OGBAGA, C. C.; STEPIEN, P.; DYSON, B. C.; RATTRAY, N. J. W.; ELLIS, D. I.; GOODACRE, R.; JOHNSON, G. N. Biochemical analyses of sorghum varieties reveal differential responses to drought. **PLoS One**, v. 11, n. 5, e0154423, 2016.

OGBAGA, C. C.; STEPIEN, P.; JOHNSON, G. N. Sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties adopt strongly contrasting strategies in response to drought. **Physiologia Plantarum**, v. 152, n. 2, p. 389-401, 2014.

ORTIZ, D.; HU, J.; SALAS FERNANDEZ, M. G. Genetic architecture of photosynthesis in *Sorghum bicolor* under non-stress and cold stress conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 16, p. 4545-4557, 2017.

- PADMAPRIYA, S.; MURUGAN, N.; RAGAVENDRAN, C.; THANGABALU, R.; NATARAJAN, D. Phytoremediation potential of some agricultural plants on heavy metal contaminated mine waste soils, Salem District, Tamilnadu. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 3, p. 288-294, 2016.
- PARRA-LONDONO, S.; FIEDLER, K.; KAVKA, M.; SAMANS, B.; WIECKHORST, S.; ZACHARIAS, A.; UPTMOOR, R. Genetic dissection of early-season cold tolerance in sorghum: genome-wide association studies for seedling emergence and survival under field and controlled environment conditions. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 131, p. 581-595, 2018.
- PARROTTA, L.; FALERI, C.; CRESTI, M.; CAI, G. Heat stress affects the cytoskeleton and the delivery of sucrose synthase in tobacco pollen tubes. **Planta**, v. 243, p. 43-63, 2016.
- PAUL, C. **Agronomia del sorgo**: programa del mejoramento del ICRISAT para América Latina. El Salvador: Centro de Tecnología Agrícola, 1990.
- PRASAD, P. V. V.; DJANAGUIRAMAN, M.; PERUMAL, R.; CIAMPITTI, I. A. Impact of high temperature stress on floret fertility and individual grain weight of grain sorghum: sensitive stages and thresholds for temperature and duration. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, article 820, 2015.
- PRISCO, J.; GOMES-FILHO, E. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas. In: GHEYI, H.; DIAS, N.; LACERDA, C. (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2010. p. 143-159.
- RASKIN, I.; SMITH, R. D.; SALT, D. E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 8, n. 2, p. 221-226, 1997.
- RIZWAN, M.; ALI, S.; QAYYUM, M. F.; OK, Y. S.; ZIA-UR-REHMAN, M.; ABBAS, Z.; HANNAN, F. Use of maize (*Zea mays* L.) for phytomanagement of Cd-contaminated soils: a critical review. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 39, n. 2, p. 259-277, 2017.

SAAD, M. M. A.; ABO-KOURA, H. A. Improvement of Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) growth and yield under drought stress by inoculation with *Bacillus cereus* and foliar application of potassium silicate. **Environmental, Biodiversity and Soil Security**, v. 2, article 16, 2018.

SANS, L. M. A.; MORAIS, A. V. de C. de; GUIMARÃES, D. P. **Época de plantio de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 80).

SERME, I.; OUATTARA, K.; LOGAH, V.; TAONDA, J. B.; PALE, S.; QUANSAH, C.; ABAIDOO, C. R. Impact of tillage and fertility management options on selected soil physical properties and sorghum yield. **International Journal of Biological and Chemical Sciences**, v. 9, n. 3, p. 1154-1170, 2015.

SHABALA, S. Physiological and cellular aspects of phytotoxicity tolerance in plants: the role of membrane transporters and implications for crop breeding for waterlogging tolerance. **New Phytologist**, v. 190, n. 2, p. 289-298, 2011.

SHARMA, A.; NAGPAL, A. K. Soil amendments: a tool to reduce heavy metal uptake in crops for production of safe food. **Reviews in Environmental Science Bio/Technology**, v. 17, p. 187-203, 2018.

SHARMA, A. D.; SINGH, N.; KANG, J. K. Short-term waterlogging-induced changes in phosphatase activities in shoots and roots of sorghum seedlings: role of phosphatases during waterlogging in relation to phosphorus. **General and Applied Plant Physiology**, v. 31, n. 1/2, p. 71-79, 2005.

SILVA, A. G.; ROCHA, V. S.; CECON, P. R.; PORTUGAL, A. F.; PINA FILHO, O. C. Avaliação dos Caracteres agrônômicos de cultivares de sorgo forrageiro sob diferentes condições termofotoperiódicas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 1, p. 28-44, 2005.

SILVA, E. M. da. **Características associadas à tolerância a seca em híbridos de sorgo contrastantes**: uma abordagem morfoanatômica, fisiológica e bioquímica. 2018. 53 p. Tese (Doutorado em Botânica Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SINGH, S.; VIRDI, A. S.; JASWAL, R.; CHAWLA, M.; KAPOOR, S.; MOHAPATRA, S. B.; MANOJ, N.; PAREEK, A.; KUMAR, S.; SINGH, P. A temperature-responsive gene in sorghum encodes a glycine-rich protein that interacts with calmodulin. **Biochimie**, v. 137, p. 115-123, 2017a.

SINGH, V.; NGUYEN, C. T.; McLEAN, G.; CHAPMAN, S. C.; ZHENG, B.; OOSTEROM, E. J. van; HAMMER, G. L. Quantifying high temperature risks and their potential effects on sorghum production in Australia. **Field Crops Research**, v. 211, p. 77-88, 2017b.

SOUZA, T. Ecofisiologia e suas implicações no manejo cultural do milho safrinha. In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 14., 2017, Cuiabá. **Construindo sistemas de produção sustentáveis e rentáveis: livro de palestras**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2017. p. 43-85.

SOUZA, T. C. de; SOUZA, K. R. D. de; MAGALHÃES, P. C. Respostas morfofisiológicas do milho e sorgo sob déficit hídrico. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 32., 2018, Lavras. **Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil: livro de palestras**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2018. p. 576-621.

SUI, N.; YANG, Z.; LIU, M.; WANG, B. Identification and transcriptomic profiling of genes involved in increasing sugar content during salt stress in sweet sorghum leaves. **BMC Genomics**, v. 16, article 534, 2015.

TABOSA, J. N.; REIS, O. V. dos; BRITO, A. R. de M. B.; MONTEIRO, M. C. D.; SIMPLÍCIO, J. B.; OLIVEIRA, J. A. C. de; SILVA, F. G. da; AZEVEDO NETO, A. D. de; DIAS, F. M.; LIRA, M. de A.; TAVARES FILHO, J. J.; NASCIMENTO, M. M. A. do; LIMA, L. E. de; CARVALHO, H. W. L. de; OLIVEIRA, L. R. de. Comportamento de cultivares de sorgo forrageiro em diferentes ambientes agroecológicos dos estados de Pernambuco e Alagoas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, n. 2, p. 47-58, 2002.

TACK, J.; LINGENFELSER, J.; JAGADISH, S. V. K. Disaggregating sorghum yield reductions under warming scenarios exposes narrow genetic diversity in US breeding programs. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 35, p. 9296-9301, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

THAKUR, P.; KUMAR, S.; MALIK, J. A.; BERGER, J. D.; NAYYAR, H. Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview. **Environmental of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 429-443, 2010.

TIAN, Y. L.; ZHANG, H. Y.; GUO, W.; WEI, X. F. Morphological responses, biomass yield, and bioenergy potential of sweet sorghum cultivated in cadmium-contaminated soil for biofuel. **International Journal of Green Energy**, v. 12, n. 6, p. 577-584, 2015.

VAMERALI, T.; BANDIERA, M.; MOSCA, G. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 8, p. 1-17, 2010.

VANDERLIP, R.; REEVES, H. Growth stages of sorghum. **Agronomy Journal**, v. 64, n. 1, p. 13-16, 1972.

VASILAKOGLU, I.; DHIMA, K.; KARAGIANNIDIS, N.; GATSIS, T. Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. **Field Crops Research**, v. 120, n. 1, p. 38-46, 2011.

VON PINHO, R.; FIORINI, I.; SANTOS, A. Botânica do sorgo. In: BORÉM, A.; PIMENTEL, I.; PARRELA, R. A. C. (ed.). **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. p. 37-57.

WANG, X.; CHEN, C.; WANG, J. Phytoremediation of strontium contaminated soil by *Sorghum bicolor* (L.) Moench and soil microbial community-level physiological profiles (CLPPs). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 7668-7678, 2017a.

WANG, X.; CHEN, C.; WANG, J. Cs phytoremediation by *Sorghum bicolor* cultivated in soil and in hydroponic system. **International Journal of Phytoremediation**, v. 19, n. 4, p. 402-412, 2017b.

WILCOX, C. S.; FERGUSON, J. W.; FERNANDEZ, G. C. J.; NOWAK, R. S. Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. **Journal of Arid Environments**, v. 56, n. 1, p. 129-148, 2004.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, p. 3099-3107, 2013.

ZHANG, F.; WANG, Y.; YU, H.; ZHU, K. Effect of excessive soil moisture stress on sweet sorghum: physiological changes and productivity. **Pakistan Journal of Botany**, v. 48, p. 1-9, 2016.

ZHANG, R.; ZHOU, Y.; YUE, Z.; CHEN, X.; CAO, X.; AI, X.; JIANG, C.; XING, Y. The leaf-air temperature difference reflects the variation in water status and photosynthesis of sorghum under waterlogged conditions. **PLoS One**, v. 14, n. 7, e0219209, 2019.

ZHU, G.; AN, L.; JIAO, X.; CHEN, X.; ZHOU, G.; McLAUGHLIN, N. Effects of gibberellic acid on water uptake and germination of sweet sorghum seeds under salinity stress. **Chilena Journal of Agricultural Research**, v. 79, n. 3, p. 415-424, 2019.

ZÖRB, C.; GEILFUS, C. M.; DIETZ, K. J. Salinity and crop yield. **Plant Biology**, v. 21, n. S1, p. 31-38, 2019.

ZUO, W.; GU, C.; ZHANG, W.; XU, K.; WANG, Y.; BAI, Y.; SHAN, B.; DAI, Q. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 541-549, 2019.

Capítulo 4

Uso da macho-esterilidade no melhoramento genético do sorgo

Isadora Cristina Martins Oliveira
Cícero Beserra de Menezes
Rafael Augusto da Costa Parrella
Robert Eugene Schaffert

Introdução

O melhoramento genético é uma ferramenta essencial na busca por genótipos mais produtivos e adaptados às diferentes condições edafoclimáticas. Dada a intensificação das mudanças climáticas, com eventos extremos de secas e estiagens prolongadas, e os constantes relatos de grandes prejuízos agrícolas, estes estudos têm se tornado cada vez mais importantes. Neste âmbito o sorgo se destaca pela sua adaptação natural às condições ambientais adversas e pela sua versatilidade, tendo papel cada vez mais importante quando se tratam de segurança alimentar e bioenergias.

Dentre as utilidades do sorgo, destaca-se o uso de grãos e forragem na alimentação humana e animal, e o uso do caldo e da biomassa na produção de etanol, energia térmica e biogás, importantes componentes da matriz energética nacional.

Pela planta de sorgo ser autógama, com grande número de flores nas panículas, em que cada uma delas gera apenas uma semente, a síntese de híbridos em escala comercial na cultura seria inviável pelo elevado número de emascações manuais necessárias nas plantas a serem polinizadas. Entretanto, em razão da existência de mecanismos de macho-esterilidade, o melhoramento genético em sorgo pode ser conduzido semelhantemente ao de culturas alógamas. Dois tipos de macho-esterilidade são amplamente utilizados em sorgo, a macho-esterilidade genética (GMS) e a macho-esterilidade genético-citoplasmática (CMS). Em síntese, a GMS é utilizada em estratégias de melhoramento populacional e a CMS é utilizada na produção de híbridos. Estes dois tipos de macho-esterilidade serão descritas

neste capítulo, mostrando as etapas de desenvolvimento de linhagens e síntese de híbridos adotadas pelos programas de melhoramento de sorgo.

Macho-Esterilidade Genética

A macho-esterilidade genética é condicionada por dois alelos recessivos em homozigose no núcleo das células (Figura 1). As principais causas desta macho-esterilidade estão relacionadas à ausência ou degeneração dos grãos de pólen, falta de pólen viável, ou indeiscência da antera quando o estigma está receptivo (Reddy et al., 2003).

No melhoramento genético da cultura do sorgo, a utilização de genes de macho-esterilidade possibilitou o desenvolvimento de novas abordagens, por exemplo, a síntese de populações de intercruzamento ao acaso. Pela não necessidade de emasculação das plantas durante os cruzamentos, os melhoristas de sorgo podem adotar a seleção recorrente para síntese de interpopulações, como ocorre nos programas de melhoramento de culturas alógamas, como o milho (*Zea mays* L.).

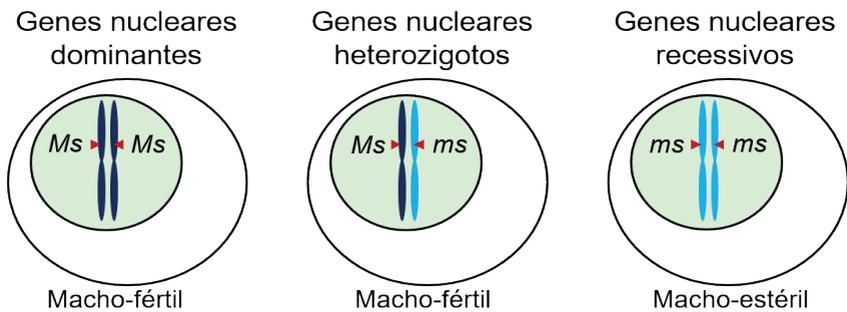


Figura 1. Genótipo e fenótipo de plantas com sistema de macho-esterilidade genética (GMS).

Os principais genes de macho-esterilidade GMS relatados no sorgo estão apresentados na Tabela 1. O gene ms_3 , descoberto em 1965 por Webster (Webster, 1965), é o mais utilizado para o desenvolvimento de populações de intercruzamento ao acaso pelos programas de melhoramento de sorgo no mundo. Este gene apresenta boa e estável expressão da macho-esterilidade, possibilitando a produção de muitas sementes sob polinização aberta, além de ser facilmente identificado em campo. Além disso, o gene ms_3 funciona em ambos os citoplasmas do sorgo, *Milo* e *Kafir*, possibilitando o desenvolvimento de populações R, restauradoras de fertilidade, e populações B, mantenedoras

de fertilidade. Outros genes úteis nos programas de melhoramento de sorgo são o ms_1 (Ayyangar; Ponnaiya, 1937) e o ms_7 (Andrews; Webster, 1971), e apresentam expressões semelhantes ao ms_3 .

Tabela 1. Genes de macho-esterilidade genética em sorgo.

Fonte	Origem	Característica	Referências
ms_1 Indigenous line	Índia	Boa macho-esterilidade, altamente receptivo	Ayyangar e Ponnaiya (1937) Stephens e Holland (1954)
ms_2 Blackhull kafir	EUA	Esterilidade feminina, produz pouca semente	Stephens (1937)
ms_3 Goes	EUA	Boa macho-esterilidade, altamente receptivo	Webster (1965)
ms_4 Indigenous line	Índia	Anteras sem pólen	Ayyangar (1942)
ms_5 Rancher	Hungria	Aborto do pólen	Barabas (1962)
ms_6 Rancher	Hungria	Anteras sem pólen	Barabas (1962)
ms_7 Indigenous line	Nigéria	Boa macho-esterilidade, altamente receptivo	Andrews e Webster (1971)
ms_8	EUA	Anteras sem pólen. Obtido através de mutação de BTx623	Xin et al. (2017)
<i>al</i>	EUA	Antera sem estame	Karper e Stephens (1936)

Fonte: Rooney (2000), Reddy et al. (2005), Dweikat (2014).

Alguns destes genes, citados na Tabela 1, foram utilizados em sínteses de populações, porém, apresentaram resultados insatisfatórios por causa da expressão variável da macho-esterilidade (Ross, 1973). Como exemplo tem-se o gene ms_2 que, em homozigose (ms_2ms_2), apresenta alto grau de esterilidade feminina, juntamente com esterilidade masculina, o que

promove uma baixa formação de grãos na panícula após a autofecundação destas plantas (Ross; Gardner, 1983). Além disso, quando há segregação para este gene nas famílias utilizadas, ocorre um viés no rendimento de grãos durante a avaliação das progênies, o que não é desejável pelo melhorista.

Problemas semelhantes são encontrados na utilização do gene *al* (*antherless*) para a síntese de populações de sorgo (Eckeobil et al., 1977; Ross, 1973). Além dos genes listados na Tabela 1, ainda existem genes de esterilidade masculina relatados na literatura que não foram testados no melhoramento de sorgo (Xin et al., 2017), mostrando a importância de mais estudos neste âmbito (Dweikat, 2014).

Para utilização deste sistema de macho-esterilidade, as plantas macho-estéreis devem ser identificadas nas fases iniciais do florescimento, ou seja, quando as flores do topo da panícula estiverem em antese. Esta identificação pode ser facilmente realizada, pois as plantas macho-estéreis apresentam anteras menores, mais finas e com coloração amarelo-clara, e não liberam pólen viável (Figura 2 A). Após a identificação destas plantas, deve-se remover a ponta da panícula e protegê-la com saco de papel *Kraft*, a fim de evitar a polinização aberta e contaminação por pólen externo. Assim, após três a cinco dias, a panícula estará receptível e pode então ser polinizada com o pólen coletado do progenitor desejado. Os híbridos desses cruzamentos podem ser usados para melhorar a população ou para iniciar outro método de melhoramento, como a seleção por pedigree para síntese de linhas puras melhoradas.



Foto: Isadora Martins

Figura 2. Estrutura floral de plantas macho-estéreis (A) e macho-férteis (B). (A) Planta macho-estéril com anteras pálidas e estigmas plumosos (receptivo). (B) Planta macho-fértil com anteras produzindo pólen (amarelo intenso).

Melhoramento Populacional de Sorgo Utilizando Macho-Esterilidade Genética

O melhoramento populacional é normalmente realizado para características com herança quantitativa, ou seja, características controladas por muitos genes, e a seleção recorrente é o método de melhoramento mais utilizado no desenvolvimento de novas populações. Em síntese, a seleção recorrente é um esquema cíclico de recombinação e seleção de genótipos em que a frequência de alelos favoráveis é constantemente aumentada na população. Essas etapas são designadas para atingir dois objetivos, sendo eles o aumento do desempenho médio da população, dado o aumento da frequência gênica de alelos favoráveis da característica, ou de características, em seleção, e a manutenção da variabilidade genética, dada a recombinação de genótipos superiores, em quantidade de selecionados, que assegure a preservação desta variabilidade (Nath, 1982; Singh, 2004).

No caso do sorgo, a utilização da macho-esterilidade genética possibilitou a conversão de populações normalmente de autofecundação em populações de fecundação cruzada. Assim, estas populações podem ser melhoradas por métodos de seleção recorrente, que são utilizados com sucesso na cultura do milho, por exemplo (Doggett; Eberhart, 1968; Gardner, 1972). O sistema de macho-esterilidade utilizado na síntese de populações de sorgo envolve geralmente o gene ms_3 , da variedade Coes, de herança simples, que produz plantas macho-estéreis quando em homozigose recessiva (ms_3ms_3) e plantas macho-férteis em condições heterozigotas (Ms_3ms_3) ou homozigotas para o alelo dominante (Ms_3Ms_3). O desenvolvimento de uma população usando macho-esterilidade envolve três passos. Primeiro, deve-se selecionar os materiais genéticos que serão inter cruzados; em seguida, incorporar um gene de macho-esterilidade genética; e por fim inter cruzar ao acaso as linhagens selecionadas, que darão origem à nova população.

A seleção das linhagens mais adequadas para o desenvolvimento de uma população é uma importante decisão e depende principalmente do objetivo do melhorista. As populações de sorgo têm sido desenvolvidas utilizando-se somente linhagens B (mantenedoras da fertilidade), somente linhagens R (restauradoras da fertilidade) ou uma mistura de ambas as linhagens. As populações de linhagens do tipo B e do tipo R são sintetizadas separadamente, e uma vez que não sofrem a interferência dos alelos Rf e rf , do gene ligado à macho-esterilidade citoplasmática, a extração de cada tipo destas linhagens ocorre de forma fácil dentro de cada população

(Doggett; Eberhart, 1968; Gardner, 1972; Ross, 1973; Schaffert et al., 2016). De modo geral, nos programas de melhoramento, as populações têm sido desenvolvidas com um mínimo de oito e um máximo de 800 linhagens, e para a maioria dos objetivos, um total de 20 a 40 linhagens, selecionadas cuidadosamente, já são suficientes para suprir os principais objetivos dos programas de melhoramento.

Para síntese de uma nova população, individualmente as linhagens escolhidas são cruzadas manualmente, com uma fonte de macho-esterilidade genética *ms* (*msms*) (Figura 3). A geração F_1 possui plantas em heterozigose (*Msms*) para a macho-esterilidade, ou seja, plantas macho-férteis. Assim, é preciso uma geração de autofecundação para que os genótipos macho-estéreis (*msms*) possam ser formados. As plantas férteis F_1 de cada cruzamento são autofecundadas, e as sementes F_2 darão origem às plantas férteis (25%*MsMs* e 50%*Msms*) e estéreis (25%*msms*). As plantas F_2 macho-estéreis (*msms*) são identificadas durante o florescimento, e quando atingida a maturação dos grãos, as panículas são colhidas separadamente, e serão usadas em novos retrocruzamentos ou destinadas ao primeiro ciclo de recombinação.

Para a seleção recorrente, igual quantidade de sementes de cada uma destas panículas F_2 macho-estéreis é misturada para formar a primeira geração de recombinação, e o mesmo procedimento é realizado para obtenção da segunda e da terceira geração de recombinação. Em todos os ciclos de intercruzamentos as populações são plantadas em campo isolado (aproximadamente 1.000 m²), em baixa densidade populacional, e deve-se etiquetar de 600 a 1.000 plantas macho-estéreis, as quais serão colhidas e trilhadas panícula por panícula. Na terceira geração a proporção de plantas férteis (*Msms*) e de estéreis (*msms*) se aproxima de 1:1. As sementes colhidas do último ciclo de recombinação são chamadas de sementes S_0 , que significa sem nenhuma autofecundação. A manutenção da população é feita conforme o mesmo procedimento utilizado para a segunda e terceira gerações de recombinação, ou seja, quando do florescimento das plantas, identificam-se as panículas macho-estéreis e apenas sementes destas são colhidas para formação da nova população.

Um mínimo de três ciclos de intercruzamentos ao acaso deve ser realizado antes do início da seleção. No caso de caracteres mono ou oligogênicos, como resistência a doenças, formato de panícula, altura de plantas, teor de lisina, entre outros, são necessários poucos ciclos de recombinação. Entretanto, muitas gerações de cruzamento ao acaso são

requeridas para que grupos de ligação sejam quebrados, para características mais complexas, como produtividade de grãos ou tolerância à seca. Dessa forma, após o último ciclo de recombinação, a população pode ser utilizada para autofecundação e extração de linhagens, assim como seleção para novos ciclos de seleção recorrente. Vale ressaltar que para pleno sucesso do melhoramento populacional é imprescindível que as áreas de campos isolados não tenham contaminantes, principalmente sorgo selvagem (Schaffert et al., 2016). Além da seleção recorrente, o melhorista de sorgo pode utilizar as sementes F_2 macho-estéreis (*msms*) para dar início aos retrocruzamentos identificados, a fim de obter linhagens com características desejadas, já observadas na segunda geração.

O uso da macho-esterilidade genética facilita a hibridação, mas também requer alguns cuidados com a população durante a antese das plantas (Figura 3). Uma vez terminado o intercruzamento, as linhagens devem ser extraídas por ciclos de autofecundações com seleção para que os alelos *ms* recessivos sejam eliminados, caso contrário, progênies estéreis seriam produzidas em gerações futuras. Por sua vez, linhagens segregantes para a macho-esterilidade genética podem ser mantidas por autofecundação de panículas selecionadas aleatoriamente, ou por polinização em *bulk* de panículas macho-estéreis com pólen de plantas macho-férteis heterozigotas (*Msms*).

Métodos de Melhoramento Intrapopulacionais

Os métodos intrapopulacionais estão entre os métodos de seleção recorrente mais eficientes para obtenção de progênies superiores. O uso destes métodos pode promover o aumento da média de uma característica na população *per se*, possibilitando a extração de linhagens superiores em ciclos futuros. Os métodos mais usuais são a seleção massal, a seleção entre famílias de meios irmãos, a seleção entre famílias de irmãos germanos e a seleção de famílias S1. Os métodos de seleção normalmente empregados em programas de melhoramento populacional de sorgo são os mesmos utilizados para plantas alógamas, porém a escolha de uma população e dos métodos a serem adotados para o desenvolvimento de intrapopulações depende da performance média da população e da magnitude dos efeitos (A-aditivo, D-dominância e I-epistasia) que compõem a variância genética ($G = A+D+I$).

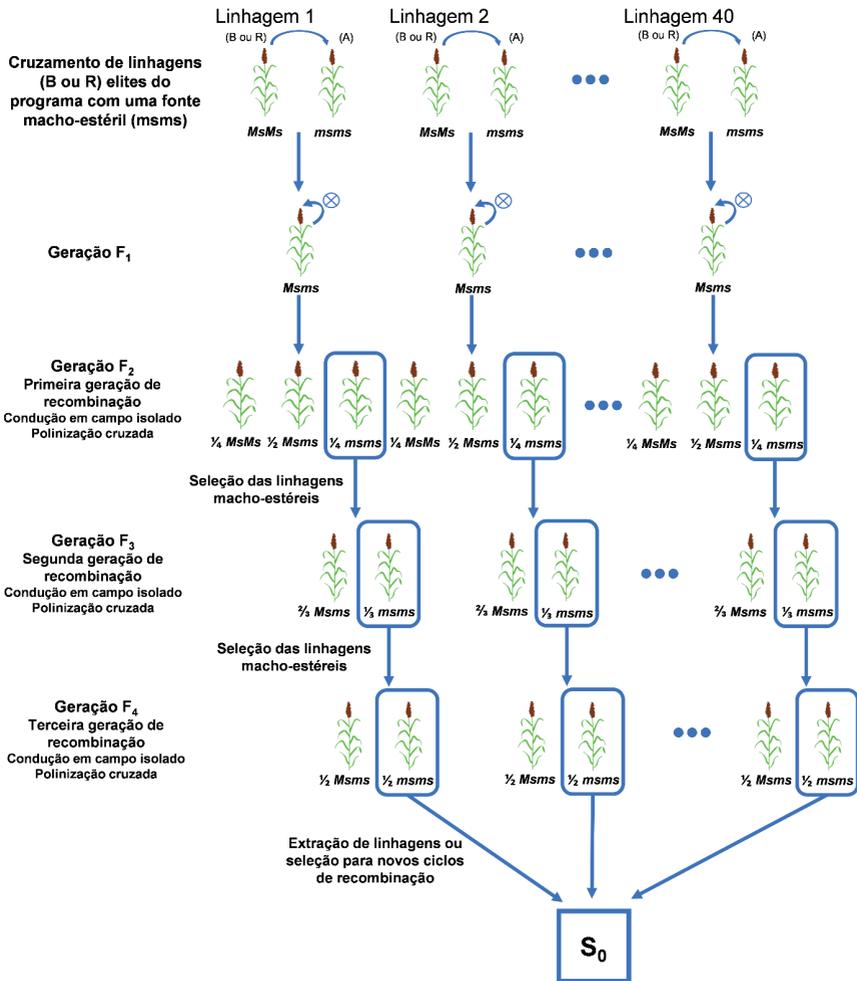


Figura 3. Esquema de síntese de populações de linhagens B e R, através do uso da macho-esterilidade genética e seleção recorrente em sorgo.

O método da seleção massal é o mais prático e eficiente para seleção de características de alta herdabilidade, ou seja, controladas por poucos genes, como resistência a doenças e teor de açúcares no colmo. Já para características controladas por muitos genes a seleção de famílias de irmãos germanos é o método mais eficiente, porém necessita de cruzamentos controlados, o que requer mão de obra especializada. A seleção de famílias

de meios-irmãos também pode ser utilizada para seleção de características quantitativas e, apesar de apresentar menor eficiência, tem como vantagem a não necessidade de cruzamentos controlados, o que torna uma vantagem sobre o método dos irmãos germanos, dados a escassez e os altos custos de mão de obra especializada para trabalhos de campo.

Contudo, para a seleção de linhagens superiores quanto a características de baixa herdabilidade, como a produtividade de grãos e produção de biomassa, são necessárias avaliações em experimentos com repetições e em maior número de locais, a fim de se obter maior eficiência no processo de seleção.

Métodos Interpopulacionais

Também conhecidos como método de seleção recorrente recíproca (SRR), os métodos interpopulacionais são usados com o objetivo de melhorar a performance de híbridos gerados pelo cruzamento de duas populações divergentes, ou seja, população de linhagens B e linhagens R. O método de seleção recorrente recíproca é o mais utilizado no melhoramento entre duas populações, sendo a seleção recorrente recíproca de meios-irmãos e a seleção recorrente recíproca de irmãos germanos os métodos mais utilizados.

Macho-Esterilidade Genético-Citoplasmática

A macho-esterilidade genético-citoplasmática em sorgo resulta da combinação de citoplasma *Milo*, que confere esterilidade citoplasmática, e gene *Kafir*, com alelos restauradores de fertilidade. A descoberta da macho-esterilidade genético citoplasmática (CMS) possibilitou a produção de híbridos comerciais em sorgo e se tornou importante para a indústria de sementes desta cultura. As linhagens macho-estéreis em sua maioria são muito similares, e os parentais machos são limitados àqueles que poderiam restaurar a fertilidade no sistema específico *Milo-Kafir* (Schertz, 1973; Secrist; Atkins, 1989). Outros sistemas de macho-esterilidade estão sendo estudados, e um dos propósitos é aumentar a diversidade genética para evitar riscos relacionados ao citoplasma. Assim, é necessário que novos sistemas sejam usados e que os híbridos a serem produzidos sejam tão produtivos quanto os já existentes (Schertz, 1973; Secrist; Atkins, 1989). Na Tabela 2 estão representados os dez tipos de citoplasmas descritos na literatura na atualidade.

Tabela 2. Diferentes sistemas de citoplasmas identificados em sorgo.

Grupo	Fonte	Raça	Referências
A ₁	Milo	D	Stephens e Holland (1954) Worstell et al. (1984)
	IS 6771C	G-C	
	IS 2266C	D	
	IS 6705C	G	
	IS 7502C	G	
	IS 3579C	C	
	IS 8232C	(K-C)-C	
	IS 1116C	G	
A ₂	IS12662C	G	Schertz e Ritchey (1978) Worstell et al. (1984)
	IS 2573C	C	
	IS 2816C	C	
A ₂	IS3063C	-	Worstell et al. (1984)
	IS1056C	-	
A ₃	IS1112C	D-(DB)	Quinby (1980), Worstell et al. (1984), Tang e Pring (2003)
	IS12565C	C	
	IS 6882C	K-C	
A ₄	IS7920C	G	Worstell et al. (1984)
	M35-1A	D	
	VZM2A	D	
	G1A	D	
Indian A ₄	-	-	Rao et al. (1984)
9E	IS 7218	-	Webster e Singh (1964)
	IS 112603C	G	
A ₅	IS 7506C	B	Webster e Singh (1964)
A ₆	IS 1056C	D	Webster e Singh (1964)
	IS 2801C	D	
	IS 3063C	D	
KS			Ross e Heckerott (1972)

D = durra, G = guinea, C = caudatum, B = bicolor, K = Kafir. Adaptado de Schertz (1994) e Rooney (2004).

O citoplasma mais usado no melhoramento de sorgo é o A_1 . E a restauração da fertilidade do citoplasma A_1 é controlada por um ou dois alelos, denominados Rf_1 . Portanto, uma linhagem A (macho-estéril) possui citoplasma estéril (A) e o gene restaurador no núcleo em homozigose para os alelos recessivos (rf_1rf_1); a linhagem B (mantenedora) possui citoplasma fértil (N) e gene restaurador com alelos recessivos (rf_1rf_1); e a linhagem R possui citoplasma fértil (N) e gene restaurador com pelo menos um alelo na forma dominante (Rf_1Rf_1 ou Rf_1rf_1). Na Figura 4 pode-se notar a diferença entre as linhagens base dos programas de melhoramento de sorgo.

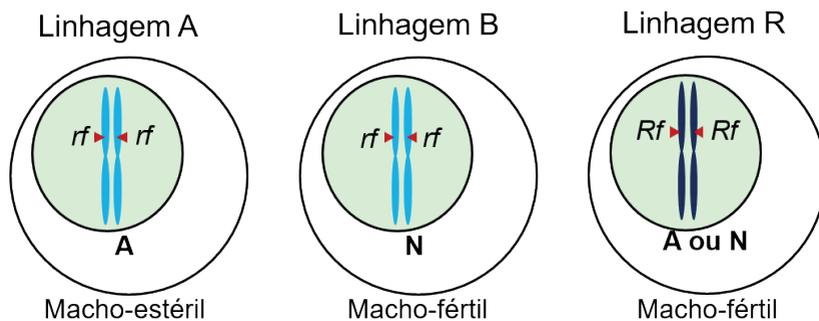


Figura 4. Genótipo e fenótipo de plantas com sistema de macho-esterilidade citoplasmática (CMS).

Na maioria dos países produtores de sorgo, os híbridos utilizados possuem citoplasma *Milo*, porém o uso de um único citoplasma é limitante, pois reduz as possibilidades de diferentes combinações entre parentais para a síntese de futuros híbridos. Hoffmann e Rooney (2013), em estudos com diferentes citoplasmas em sorgo, compararam o desempenho agrônômico de três híbridos sintetizados por um polinizador comum e um genitor feminino com citoplasmas A1, A2 e A3, e mostraram que o tipo do citoplasma não interferiu na performance final dos híbridos. Porém, poucos estudos estão sendo realizados neste âmbito, mostrando a necessidade de mais pesquisa a fim de fornecer leque maior de possibilidades aos melhoristas.

No melhoramento interpopulacional, ou seja, entre duas populações, os cruzamentos-testes de linhagens R são realizados através da polinização das linhagens A macho-estéreis, resultando em híbridos $A \times R$, que mostrarão o potencial das linhagens macho-férteis. Já os cruzamentos-testes para linhagens B são mais complexos, pois devem ser realizados com as

linhagens R como genitor feminino, requerendo emascação manual. Como abordado anteriormente neste capítulo, a esterilização de linhagens R não é muito usual nos programas de melhoramento, por causa das dificuldades da emascação manual. Além disso, melhoristas relatam a presença de incompatibilidade entre os citoplasmas das linhagens B e das linhagens R, o que gera híbridos estéreis, e dificulta o melhoramento das linhagens B. Uma alternativa para isto seria o desenvolvimento de linhagens macho-estéreis R (Rf_1Rf_1) no citoplasma A_3 , as quais podem ser usadas como testadoras de linhagens B (rf_1rf_1) no citoplasma A_1 . Vale ressaltar que neste tipo de cruzamento as linhagens precisam ter citoplasmas diferentes para que a fertilidade do híbrido seja restaurada. Com isso, após a avaliação dos híbridos R \times B, as melhores linhagens B são selecionadas e esterilizadas, para síntese das respectivas linhagens A isogênicas. Mesmo com o aumento do tempo para obtenção dos cruzamentos testes, ao final do processo há uma economia de tempo e dinheiro, em razão do menor número de linhagens a serem esterilizadas para a síntese de novas linhagens macho-estéreis A.

Desenvolvimento de Híbridos de Sorgo Utilizando Macho-Esterilidade Genético Citoplasmática

Na produção de híbridos simples de sorgo são necessárias três linhagens, sendo elas: linhagem A (macho-estéril), linhagem B (mantenedora) e linhagem R (restauradora), podendo-se destacar que as linhagens B e R são macho-férteis, ou seja, produtoras de pólen viável. As linhagens A e B são isogênicas, e se diferem apenas pelo citoplasma, estéril e fértil, respectivamente, como mostrado anteriormente. As linhagens B são chamadas de mantenedoras de fertilidade, pois, não são capazes de restaurar a fertilidade da linhagem A quando usadas como doadoras de pólen. Dessa forma, as linhagens A são multiplicadas pelo cruzamento com a sua linhagem B isogênica (Figura 5), uma vez que as plantas oriundas do cruzamento entre estas duas linhagens continuam macho-estéreis, assim como a linhagem A, em razão da herança materna do citoplasma. Já a linhagem R é chamada de restauradora, pois restaura a fertilidade sobre as linhagens A, ou seja, o cruzamento entre a linhagem A e R dará origem aos híbridos, que são plantas macho-férteis. As linhagens R e A são fenotipicamente distintas, e a combinação entre elas pode resultar em híbridos com alto potencial de rendimento, pela exploração da heterose ou vigor híbrido.

A multiplicação da linhagem A e a produção de sementes híbridas,

quando em larga escala, devem ser realizadas em campos isolados para garantir que não haja contaminação de pólen indesejado. Usa-se proporção básica de três fileiras da linhagem A para uma fileira da linhagem R, sendo mais usual a condução dos campos com 9 a 12 fileiras da fêmea para 3 a 4 fileiras do macho. A multiplicação da linhagem R também deve ser feita em campo isolado, utilizando-se os mesmos procedimentos com linhas puras. Um dos principais cuidados que devem ser tomados durante a condução dos campos isolados é a programação do *split* entre as linhagens produtoras e receptoras de pólen, ou seja, proporcionar a coincidência no florescimento das duas linhagens a serem cruzadas.

Desenvolvimento de Linhagens Parentais (A, B e R)

Síntese de Novas Linhagens A, B e R

O desenvolvimento de novas linhagens parentais é realizado com base na diversidade genética, no desempenho *per se*, e na capacidade combinatória das linhagens. Os programas de melhoramento dividem as linhagens em dois grupos distintos. Um grupo (par de linhagens A e B) compreende os pares de linhagens fêmeas (A) e suas respectivas mantenedoras (B), e o segundo grupo (linhagens R) correspondente das linhagens restauradoras de fertilidade (R). Sabe-se que o sorgo apresenta heterose para a maioria das características quantitativas, como rendimento de grãos e produtividade de biomassa, porém, para isso os parentais utilizados na produção dos híbridos devem ser contrastantes e complementares. Além disso, estudos dialélicos com sorgo mostram que a capacidade geral de combinação apresenta maior importância do que a capacidade específica de combinação entre as linhagens (Kenga et al., 2004; Menezes et al., 2014, 2017; Oliveira et al., 2019).

Primeiramente, linhagens fenotipicamente superiores são extraídas das intrapopulações melhoradas, como apresentado anteriormente. Para identificar se uma linhagem é mantenedora B ou restauradora R, ela é cruzada com uma linhagem macho-estéril, o chamado cruzamento teste, e o híbrido originado deste cruzamento é avaliado quanto à restauração da fertilidade do sistema reprodutor masculino. O híbrido é plantado em pequenas parcelas, geralmente uma ou duas linhas de dois metros de comprimento, para o exame da morfologia da antera no início do florescimento, ou seja, verifica-se a produção ou não de pólen viável por um avaliador treinado. Outra forma de se realizar esta avaliação seria a proteção de quatro a seis panículas com

sacolas de polinização, confeccionadas em papel Kraft, antes do início do florescimento, e após três a quatro semanas observar a formação, ou não, de sementes nas panículas protegidas. A proteção da panícula é similar ao realizado durante a autofecundação de plantas.

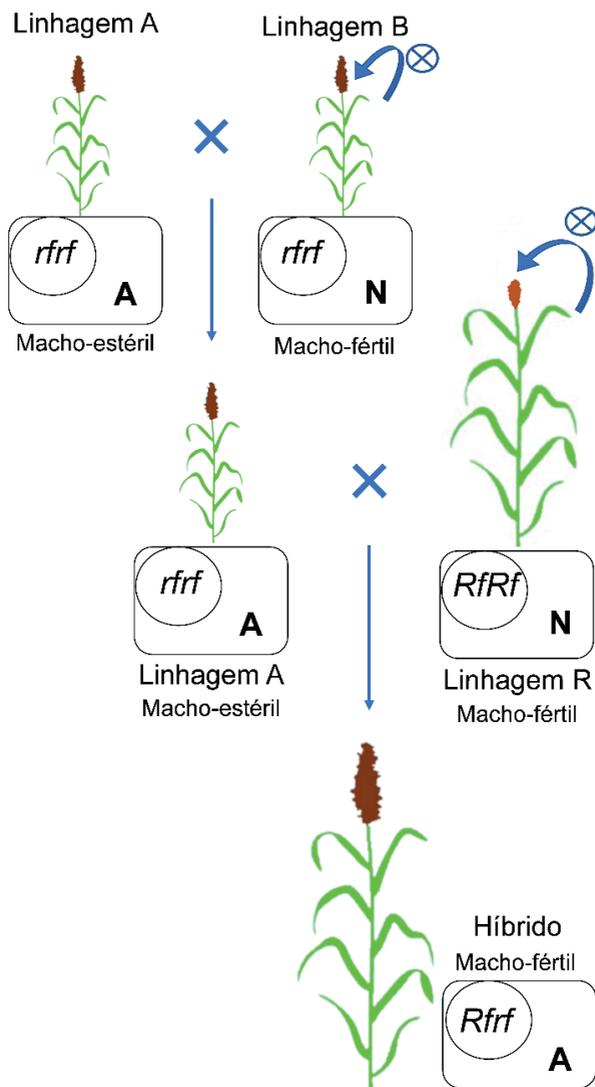


Figura 5. Uso da macho-esterilidade genética citoplasmática (CMS) na síntese de linhagem macho-estéril e híbridos em sorgo.

Estes cruzamentos-testes resultarão em híbridos de quatro tipos:

1. Híbridos sem formação de grãos em todas as panículas, ou seja, a macho-esterilidade foi mantida neste cruzamento. A linhagem usada como polinizadora é, portanto, classificada como mantenedora ou linhagem B.
2. Híbridos com completa formação de sementes em todas as panículas, ou seja, a macho-esterilidade foi restaurada. A linhagem que foi usada como polinizadora é, portanto, classificada como restauradora ou linhagem R.
3. Híbridos com formação parcial de grãos em partes da panícula. A linhagem que foi usada como polinizadora está segregando para restauração da fertilidade, portanto, necessita de mais tempo para torná-la homozigota.
4. Híbridos com formação completa de grãos em algumas panículas, e nada em outras panículas. A linhagem que foi usada como polinizadora é descartada, pois não serve nem como mantenedora nem como restauradora.

As linhagens B mantenedoras, identificadas através dos cruzamentos testes com linhagens A macho-estéreis, precisam ser esterilizadas para produzir a linhagem A isogênica a ela, ou seja, geneticamente idêntica, mas com o citoplasma macho-estéril. Para isso, a linhagem B é cruzada com uma linhagem A qualquer, que dará origem à progênie macho-estéril F_1 . Nesta etapa iniciam-se os retrocruzamentos com a linhagem B, genitor recorrente, que devem ser realizados por seis (RC_6) a sete (RC_7) gerações. Para se obter linhagens isogênicas ao final do processo, as linhagens devem ser plantadas lado a lado, e os cruzamentos devem ser individuais, ou seja, planta a planta, buscando sempre cruzar plantas morfológicamente mais semelhantes, até que ambas as linhagens se apresentem fenotipicamente similares. A realização do método planta a planta é importante, pois permite o descarte de linhagens com restauração parcial da fertilidade e seleção dos mantenedores de esterilidade parcial do programa. Além disso, o método permite a seleção mais rápida e eficiente de linhagens A com traços morfológicos similares às linhagens mantenedoras.

Após a obtenção, as linhagens A e B isogênicas podem ser mantidas e multiplicadas através do plantio de fileiras alternadas lado a lado das duas linhagens. Antes da polinização, as panículas macho-estéreis devem ser protegidas com sacola de papel *Kraft* para evitar contaminação com pólen de pais indesejados. Da mesma forma, as linhagens B também devem ser

ensacadas, para evitar contaminação da panícula. Quando as panículas macho-estéreis estiverem com o estigma emergente e plumoso, a planta está receptiva ao pólen da respectiva planta mantenedora. Com isso basta polinizar as panículas com o pólen desejado e mantê-las cobertas com saco de papel até o início da formação de grãos, a fim de evitar contaminação. A semente formada nas panículas das linhagens A são macho-estéreis, e a semente formada na linhagem B são mantenedoras das linhagens A. Deve-se ressaltar a importância de se realizar o *roguing* antes da autofecundação ou polinização das linhagens A. Assim, uma vez que as linhagens A e B uniformes são produzidas, a estabilidade masculina nas linhagens A pode ser avaliada em áreas onde as temperaturas podem atingir 42 °C ou mais, dado que as linhagens A instáveis tornam-se férteis a esta temperatura, fenômeno conhecido como restauração da fertilidade.

Produção de Sementes de Linhas A, B e R

Produção de Sementes em Pequena Escala

A produção de sementes em pequena escala de linhagens R pode ser conduzida com a semeadura da linhagem desejada em pequenas parcelas isoladas. Durante o desenvolvimento das plantas devem-se selecionar as mais semelhantes fenotipicamente, as quais terão as panículas cobertas com sacola de papel *Kraft* antes do início do florescimento até a formação dos grãos. A colheita das panículas selecionadas de um mesmo genótipo pode ser realizada conjuntamente, e elas constituirão o banco de semente desta linhagem. Parcelas de duas linhas de quatro metros de comprimento, com 10 plantas por metro linear, que, se mantidas corretamente, podem produzir de 2,0 a 2,5 kg de semente.

Já a produção de semente das linhagens A e B envolve várias operações, que devem ser cuidadosamente realizadas, conforme sequência abaixo:

1. Semear as linhagens A e B em parcelas lado a lado. Normalmente, para cada quatro fileiras da linhagem A, semeia-se duas linhas da linhagem B.
2. Conduzir regularmente o *roguing* nas linhas A e B antes e durante a antese, eliminando-se plantas atípicas. Além de plantas atípicas, como o sorgo selvagem, os dissipadores de pólen podem ser um problema para as linhagens A. Os dissipadores de pólen (*shedder*) são plantas férteis na

linha A que resultam em quebra da esterilidade masculina. E na prática, até as linhagens B que aparecem nas linhas A, por causa da mistura mecânica, também são tratadas como dissipadoras. Com isso, estas plantas devem ser removidas do campo antes e durante o florescimento, através de inspeções diárias.

3. Identificar as plantas, tanto das linhagens A, quanto das linhagens B, em início de florescimento, ou seja, com anteras e estigmas protuberantes na ponta das panículas, e cobrir com sacos de papel *Kraft* e anotar a data do ensacamento.
4. Após quatro a seis dias do início do florescimento, o pólen das panículas da linhagem B está viável. Podem ser utilizados os mesmos sacos usados para cobrir as linhagens mantenedoras, para a polinização das linhagens A que se encontram receptivas. Deve-se colocar os sacos cuidadosamente sobre as respectivas panículas da linhagem A, dobrando a planta ligeiramente e agitando as panículas juntamente com os sacos com pólen. Cada saco com pólen pode ser utilizado para polinizar de duas a três panículas da mesma linhagem A.
5. Deve-se cobrir as panículas polinizadas com o mesmo saco de pólen ou com um saco novo, e anotar a data do primeiro ensacamento e da polinização, fazendo também uma marca “A × B” indicando que foi polinizado por uma linhagem B. O saco de papel deve ser firmemente fixado em torno do pedúnculo, e grampeado para que não se solte.
6. A polinização das linhagens A com linhagens B pode ser repetida após seis ou sete dias da primeira derriça, a fim de promover a fecundação em todas as espiguetas da panícula.
7. Após a polinização das panículas das linhagens A, as panículas das linhagens B devem ser novamente ensacadas, para que não haja contaminação com pólen externo das panículas de autofecundação.
8. Após 15 a 20 dias, deve-se retirar os sacos de polinização e cobrir as panículas com sacolas confeccionadas com tela, do tipo mosqueteiro, e grampear no pedúnculo abaixo da base das panículas. A proteção com sacolas de tela é realizada para evitar, principalmente, o ataque de pássaros e insetos e permitir a ventilação, evitando doenças fúngicas.
9. No momento da colheita, com os grãos em maturação fisiológica, as panículas das linhagens A e B devem ser colhidas separadamente, e

devidamente identificadas para que não ocorra mistura de material genético.

10. A trilha dos materiais também deve ser realizada tomando os devidos cuidados para que não ocorra mistura de sementes e danificação dos grãos.

Vale ressaltar que o condutor dos cruzamentos deve fazer substituições periódicas de sacos de papel e tela danificados, para evitar contaminação e perda de sementes.

Produção de Semente em Larga Escala

A produção em grande escala das linhagens A, B e R geralmente é realizada em campos isolados (Chopra, 1982), e recomenda-se que apresente pelo menos 300 metros de distância de outros campos de sorgo. A produção das linhagens R é mais simples quando comparada à produção das linhagens A/B, pois apresenta apenas um material genético em campo. Porém, deve-se realizar os devidos cuidados, como *roguing* periódico de plantas atípicas ou fora do padrão, para uma boa condução dos campos. A colheita das sementes é realizada conjuntamente após atingir a maturação fisiológica dos grãos, e os cuidados necessários devem ser tomados para evitar mistura de sementes e perda da qualidade dos grãos.

Já a produção de sementes das linhagens A e B é feita através do plantio de quatro linhas da linhagem A, alternadas com duas linhas da linhagem B isogênica correspondente. Recomenda-se que, no final de todas as linhas em todo o campo, uma faixa de um metro de comprimento seja semeada com a linhagem B, o que garante o fornecimento de pólen para todas as panículas da linhagem A. O *roguing* das plantas atípicas e disseminadoras de pólen deve ser realizado todos os dias, para que não haja antese de produtores de pólen indesejáveis e contaminação dos campos de produção. A polinização pelo vento assegurará a formação de sementes nas linhagens A; já a polinização das linhagens B é realizada pela autofecundação. A colheita das sementes das linhagens A e B deve ser realizada separadamente e devidamente identificada para não haver mistura de sementes macho-estéreis e macho-férteis. Ainda, a fim de evitar a mistura mecânica de sementes durante a colheita, recomenda-se que sejam colhidas em diferentes épocas, de preferência uma após a outra.

Melhoramento de Linhagens A e B

Até agora, neste capítulo, foram tratados apenas os procedimentos de desenvolvimento de novas linhagens A através das linhagens B, dados os cruzamentos-teste. Mas é de extrema importância o conhecimento dos procedimentos envolvidos na melhoria das linhagens A e B em programas de melhoramento de híbridos.

Entre as principais características de interesse do melhorista podem ser citadas a resistência aos fatores bióticos ou abióticos e a maior produtividade de grãos. Neste capítulo vamos considerar como exemplo a piramidação da resistência/tolerância a uma determinada doença cuja linhagem A/B é suscetível. Mas os procedimentos a serem seguidos serão os mesmos para quaisquer características. Vale ressaltar, neste caso, a importância da presença do patógeno na área, caso contrário não será possível realizar a seleção. Com isso, as seguintes etapas são envolvidas no melhoramento destas linhagens:

1. Identificar as linhagens A/B que se deseja melhorar, e as linhagens que serão usadas como fonte da característica de interesse. As linhagens usadas como fonte da característica de interesse podem ser tanto restauradoras de fertilidade (R), quanto mantenedoras (B).
2. Deve-se cruzar a linhagem B com a linhagem fonte selecionada, e avançar a progênie até a geração F_2 , onde haverá segregação para as diferentes características.
3. Cultivar as plantas F_2 e observar a resistência/tolerância à doença em foco. Nesta etapa também se pode realizar a seleção para características monogênicas ou oligogênicas, de interesse dos melhoristas.
4. As sementes F_3 das plantas selecionadas na etapa anterior devem ser cultivadas e avaliadas para a característica de interesse. Devem ser selecionadas plantas com a combinação desejada de traços para compor a família selecionada para resistência, e que apresentem uniformidade entre si. Simultaneamente, estas linhagens segregantes F_3 selecionadas devem ser avaliadas em testcross com uma linhagem A qualquer, que será semeada separadamente perto do viveiro onde as plantas F_3 estão sendo avaliadas.
5. As sementes F_4 das plantas selecionadas na etapa anterior devem ser cultivadas e avaliadas para a característica de interesse. Simultaneamente,

as sementes originadas do testcross devem ser plantadas, nas proximidades do viveiro onde estão sendo realizadas as seleções, para avaliação do poder de restauração de fertilidade das linhagens selecionadas na etapa anterior. A macho-esterilidade pode ser analisada por um avaliador experiente ou através da proteção das panículas, como explicado anteriormente neste capítulo. Com isso, após identificar as progênies F_1 macho-estéreis, deve-se identificar as respectivas progênies F_4 no viveiro e selecionar dentro delas as plantas dentro do padrão, para dar continuidade ao processo.

6. Deve-se retrocruzar, planta a planta, duas a três panículas macho-estéreis F_1 com pólen de plantas da família F_5 , que devem ser também autofecundadas. Estes cruzamentos devem ser realizados entre as plantas que mais se assemelhem fenotipicamente. Identificar cada cruzamento realizado, e após a maturação fisiológica dos grãos deve-se colher as panículas separadamente.
7. Em casa de vegetação, plantar o par de panículas cruzadas lado a lado, e conduzir os retrocruzamentos entre os pares de linhagens A e B por seis a sete gerações. Deve-se, em todas as etapas, tomar os seguintes cuidados: verificar a esterilidade masculina das linhagens A, e realizar o retrocruzamento de planta a planta, sempre avaliando a semelhança morfológica entre as plantas macho-estéreis e os polinizadores selecionados.
8. No estágio em que as linhas macho-estéreis se assemelham às respectivas linhagens mantenedoras, e não segregam, elas então são chamadas de linhagens A e B. As linhagens B ainda podem ser selecionadas com base em seu desempenho *per se*, e em razão da resistência aos fatores de interesse.
9. A seleção adicional de linhagens A pode ser realizada com base em testes de capacidade geral de combinação, em cruzamentos com linhagens R elites, para características de interesse. Assim, as linhagens A e B selecionadas podem, portanto, ser nomeadas. Uma nomenclatura usual é a numeração com o ano, seguida do número de série e das letras A ou B para indicar que são macho-estéreis ou mantenedoras, respectivamente.
10. A manutenção das linhagens A selecionadas deve ser feita de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

A abordagem do melhoramento, de acordo com normas propostas pelo Instituto Internacional de Pesquisa de Cultivos para Trópicos Semiáridos (ICRISAT), facilitou o uso de linhagens de diversas origens genéticas e proporcionou o aumento da diversidade genética nos bancos de germoplasma dos programas de melhoramento genético pelo globo. Porém, estudos ainda devem ser realizados na busca por genótipos mais produtivos e resistentes ou tolerantes aos diferentes fatores bióticos e abióticos, a fim de produzir híbridos cada vez mais competitivos para o mercado. Além disso, diversos estudos buscam promover a disponibilidade e utilização de diferentes citoplasmas para maior diversificação das linhagens parentais e dos híbridos, o que diminuirá os riscos proeminentes, por causa da utilização em massa de um único citoplasma, como ocorre na atualidade.

Marcadores Moleculares Associados a Genes de Restauração da Fertilidade

Os programas de melhoramento de sorgo não realizam com frequência cruzamentos entre linhagem B e R. Geralmente, os grupos de genótipos em sorgo são mantidos separados como mantenedores ou restauradores, tipo $B \times B$ ou $R \times R$ (Andrews et al., 1997; House, 1985). Porém, quando características de interesse do melhorista estão presentes apenas nas linhagens R, e há a necessidade de transferir para as linhagens B, ou vice-versa, estes cruzamentos são inevitáveis. Com isso, torna-se necessária a síntese de gerações segregantes do cruzamento entre as linhagens B e R, para a identificação visual da restauração, ou não, da fertilidade em cruzamentos-teste, o que torna o processo moroso (Rooney, 2004).

O reduzido número de cruzamentos $B \times R$ citado anteriormente se deve basicamente a esta dificuldade e morosidade em identificar as linhagens mantenedoras e, também, visando a manutenção da distância genética entre linhagens a serem utilizadas como fêmeas (Linhagens A) e as linhagens macho, restauradoras da fertilidade (linhagens R) em programas de produção de híbridos. Como existe uma maior variabilidade genética nas linhagens R, os melhoristas de sorgo sempre estão precisando cruzar B com R para melhorar alguma característica nas linhagens mantenedoras, principalmente para incorporação de genes de resistência a doenças. Assim, a utilização de marcadores para genes de restauração de fertilidade ampliará as possibilidades de desenvolvimento de linhagens B e, conseqüentemente, de linhagens A, o que aumenta as possibilidades para a produção de híbridos

cada vez mais vigorosos e produtivos.

Um exemplo disso é o que acontece com o programa de sorgo sacarino da Embrapa Milho e Sorgo. Para se obter híbridos com altos teores de açúcares no colmo, os melhoristas necessitam que ambos os parentais possuam esta característica, uma vez que se trata de uma característica de herança monogênica e aditiva, e apresentam efeitos de dominância. No entanto, altos teores de açúcares foram encontrados apenas nas linhagens R do programa. Com isso, tornou-se necessário o cruzamento entre linhagens B, elites do programa, e as linhagens R com altos teores de açúcares, para transferência desta característica para o germoplasma A/B.

O cruzamento entre linhagens B e R resultará em plantas $F_1(Rf_1rf_1)$, as quais não são mantenedoras. Na geração F_2 as plantas segregarão na proporção 75% restauradoras ($25\%Rf_1Rf_1$ e $50\%Rf_1rf_1$) e 25% mantenedoras (rf_1rf_1). A mesma segregação ocorrerá para o loco Rf_2 . Portanto, a proporção de plantas $rf_1rf_1rf_2rf_2$ na população será de somente $1/16$. Como uma linhagem B precisa ter genótipo $rf_1rf_1rf_2rf_2$ (duplo recessivo), e não é possível diferenciar fenotipicamente entre uma linhagem $Rf_{1-}Rf_{2-}$ e $rf_1rf_1rf_2rf_2$, seria necessário o cruzamento de todas as plantas F_2 com uma linhagem A estéril, para identificar quais plantas restauram a fertilidade em cruzamentos com as linhagens A. Assim, as progênes que apresentarem todas as plantas macho-estéreis originaram-se de plantas B, da mesma forma que progênes que apresentaram plantas férteis originaram-se de plantas R.

Contudo, com a utilização de marcadores moleculares associados aos genes Rf_1 e Rf_2 é possível selecionar plantas mantenedoras já na geração F_2 do cruzamento $B \times R$, reduzindo a fenotipagem em até 16 vezes, o que reduz bastante a mão de obra e o tempo para o desenvolvimento de novas fêmeas (pares de linhagem A/B) para o programa de melhoramento. Além disso, descarta a necessidade de realizar o testcross com linhagens A, para a identificação das progênes mantenedoras. Considerando os trabalhos para aumentar o teor de açúcares nas linhagens B do programa de sorgo da Embrapa, este tipo de marcador seria de grande utilidade.

Outra situação frequente que ocorre nos programas de melhoramento de plantas é a introdução de novos germoplasmas oriundos de outros programas de melhoramento ou de bancos de germoplasma externos à instituição de pesquisa. No caso do sorgo é comum a importação de novos acessos dos Estados Unidos e da Europa. A maioria destes acessos não é identificada como B ou R. Assim, a única forma de identificar os genótipos

mantenedores é através de testcross com uma linhagem A, e avaliação da geração F_2 quanto à sua fertilidade ou macho-esterilidade.

Estudos estão sendo realizados na busca por estes marcadores. Klein et al. (2001) mapearam no cromossomo oito e posteriormente clonaram (Klein et al., 2005) o gene Rf_1 de restauração da fertilidade em sorgo. Após validação, os autores relataram que os marcadores ligados ao loco Rf_1 foram capazes de predizer a restauração da fertilidade das progênies geradas no estudo. Resultados semelhantes a este foram encontrados por Pinto et al. (2014), porém, Jordan et al. (2010) relataram resultados conflitantes em estudo realizado com diferentes linhagens-elite de sorgo. Este fato se deve, principalmente, à existência de pelo menos dois genes dominantes restauradores de fertilidade em germoplasma de sorgo comercial (Miller; Pickett 1964).

Jordan et al. (2010) relataram o mapeamento fino do gene Rf_2 em sorgo no cromossomo dois, e identificaram marcadores moleculares que, quando utilizados em conjunto com os marcadores Rf_1 , poderão ser empregados para a seleção assistida por marcadores para a geração de linhagens parentais comerciais com maior acurácia. Além disso, Jordan et al. (2011) também descreveram a existência de um terceiro loco de efeito maior, denominado Rf_3 , que apresenta capacidade de restaurar a macho-esterilidade tanto nos citoplasmas do tipo A1 quanto no tipo A2.

Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema de prospecção rápido e robusto para os genes de restauração de fertilidade é um dos maiores alvos dos programas de melhoramento e das indústrias de sementes. E a validação de polimorfismos no loco que liga a restauração da fertilidade fornecerá informações necessárias para classificar o germoplasma de sorgo sem a necessidade de demorados testes em campo.

Referências

ANDREWS, D. J.; WEBSTER, O. J. A new factor for genetic male-sterility in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 11, n. 2, p. 308-309, 1971.

ANDREWS, D. J.; EJETA, G.; GILBERT, M.; GOSWAMI, P.; ANAND KUMAR, K.; MAUNDER, A. B.; PORTER, K.; RAI, K. N.; RAJEWSKI, J. F.; REDDY, B. V. S.; STEGMEIER, W.; TALUKDAR, B. S. Breeding hybrid parents. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE GENETIC IMPROVEMENT OF SORGHUM AND PEARL MILLET, 1996, Lubbock, Texas. **Proceedings...** Lincoln: INTSORMIL, 1997. p. 173-187.

AYYANGAR, G. The description of crop plant characters and their ranges of variation. IV. Variability of Indian sorghum. **Indian Journal of Agricultural and Science**, v. 12, p. 528-563, 1942.

AYYANGAR, G. N. R.; PONNAIYA, B. W. X. The occurrence and inheritance of purple pigment on the glumes of sorghum close on emergence from the boot. **Current Science**, v. 5, n. 11, p. 590, 1937.

BARABAS, Z. Observation of sex differentiation in sorghum by use of induced malesterile mutants. **Nature**, v. 195, n. 4838, p. 257-259, 1962.

CHOPRA, K. R. **Technical guideline for sorghum and millet seed production**. Roma: FAO, 1982.

DOGGETT, H.; EBERHART, S. A. Recurrent selection in sorghum. **Crop Science**, v. 8, p. 119-121, 1968.

DWEIKAT, I. Sorghum breeding. In: WANG, Y.; UPADHYAYA, H. D.; KOLE, C. **Genetics, genomics and breeding of sorghum**. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 90-113.

ECKEBIL, J. P.; ROSS, W. M.; GARDNER, C. O.; MARANVILLE, J. W. Heritability estimates, genetic correlations, and predicted gains from S_1 progeny tests in three grain sorghum random-mating populations. **Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 373-377, 1977.

GARDNER, C. O. Development of superior populations of sorghum and their role in breeding programs. In: RAO, N. G. P.; HOUSE, L. R. (ed.). **Sorghum in seventies**. New Delhi: Oxford and IBH Publishing, 1972. p. 180-196.

HOFFMANN JR., L.; ROONEY, W. L. Cytoplasm has no effect on the yield and quality of biomass sorghum hybrids. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 3, p. 129-134, 2013.

HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1985. v. 2, 206 p.

JORDAN, D. R.; KLEIN, R. R.; SAKREWSKI, K. G.; HENZELL, R. G.; KLEIN, P. E.; MACE, E. S. Mapping and characterization of Rf5: a new gene conditioning pollen fertility restoration in A1 and A2 cytoplasm in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 123, p. 383-396, 2011.

JORDAN, D. R.; MACE, E. S.; HENZEL, R. G.; KLEIN, P. E.; KLEIN, R. R. Molecular mapping and candidate gene identification of the Rf2 gene for pollen fertility restoration in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 120, p. 1279-1287, 2010.

KARPER, R. E.; STEPHENS, J. C. Floral abnormalities in sorghum. **Journal of Heredity**, v. 27, n. 5, p. 183-194, 1936.

KENGA, R.; ALABI, S. O.; GUPTA, S. C. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Field Crops Research**, v. 88, n. 2/3, p. 251-260, 2004.

KLEIN, R. R.; KLEIN, P.; CHHABRA, A.; DONG, J.; PAMMI, S.; CHILDS, K.; MULLET, J.; ROONEY, W.; SCHERTZ, K. Molecular mapping of the rfl gene for pollen fertility restoration in sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 102, p. 1206-1212, 2001.

KLEIN, R. R.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E.; MINX, P.; ROONEY, W. L.; SCHERTZ, K. F. Fertility restorer locus Rf1 of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) encodes pentatricopeptide repeat protein not present in the colinear region of rice chromosome 12. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 102, p. 994-1012, 2005.

MENEZES, C. B.; CARVALHO JÚNIOR, G. A.; SILVA, L. A.; BERNARDINO, K. C.; SOUZA, V. F.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Combining ability of grain sorghum lines selected for aluminum tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 42-48, 2014.

MENEZES, C. B.; SANTOS, C. V.; SALDANHA, D. C.; JÚLIO, M. P. M.; SILVA, K. J.; SILVA, C. H. T.; RODRIGUES, J. A. S. Capacidade combinatória de linhagens e seleção de híbridos de sorgo granífero. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 509-523, 2017.

MILLER, D. A.; PICKETT, R. C. Inheritance of partial male-fertility in *Sorghum vulgare Pers.* **Crop Science**, v. 4, n. 1, p. 1-4, 1964.

NATH, B. Population breeding techniques in sorghum: sorghum in the eighties. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM, 1982, Patancheru. **Proceedings...** ICRISAT Center, Patancheru: ICRISAT, 1982. v. 1.

OLIVEIRA, I. C. M.; MARÇAL, T. de S.; BERNARDINO, K. da C.; RIBEIRO, P. C. de O.; PARRELLA, R. A. da C.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, J. E. de S. Combining ability of biomass sorghum lines for agroindustrial characters and multitrait selection of photosensitive hybrids for energy cogeneration. **Crop Science**, v. 59, p. 1554-1566, 2019.

PINTO, M. D. O.; SANTOS, C. V.; MENEZES, C. B.; PARRELLA, R. D. C.; SCHAFFERT, R. E.; MAGALHÃES, J. V. **Mapeamento e validação de marcadores microssatélites associados à restauração da fertilidade em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 110).

QUINBY, J. R. Interaction of genes and cytoplasm in male sterility in sorghum. In: CORN AND SORGHUM RESEARCH CONFERENCE, 35., Chicago. **Proceedings...** Chicago: American Seed Trade Association, 1980.

RAO, N. G. P.; TRIPATHI, D. P.; RANA, B. S. Genetic analysis of cytoplasmic systems in sorghum. **Indian Journal Genetics**, v. 44, p. 480-496, 1984.

REDDY, B. V. S.; SANJANA, P.; RAMAIAH, B. Strategies for improving post-rainy season sorghum: a case study for landrace hybrid breeding approach. In: WORKSHOP ON HETEROSIS IN GUINEA SORGHUM, 2003, Sotuba, Mali. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003. p. 10-14.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male-sterility in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 25, p. 139-172, 2005.

ROONEY, W. Genetics and cytogenetics. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum: origin, history, technology, and production**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

ROONEY, W. L. Sorghum improvement: integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in Agronomy**, v. 83, p. 38-110, 2004.

ROSS, W. M. Use of population breeding in sorghum: problems and prospects. In: ANNUAL CORN AND SORGHUM RESEARCH CONFERENCE, 28., 1973, Chicago. **Proceedings...** Washington: ASTA, 1973. p. 205-209.

ROSS, W. M.; GARDNER, C. O. The mechanics of population improvement in sorghum. In: PLANT BREEDING METHODS AND APPROACHES IN SORGHUM WORKSHOP FOR LATIN AMERICA, 1983, El Batan, Mexico. **Proceedings...** Mexico: CIMMYT, 1983. p. 8-38.

ROSS, W. M.; HECKEROTT, H. L. Registration of seven isocyttoplasmic sorghum germplasm lines. **Crop Science**, v. 12, p. 720, 1972.

SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. C.; MENEZES, C. B. **Síntese e melhoramento de populações de intercruzamento para aumentar recombinação genética e facilitar seleção recorrente em sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**. Sete Lagoas, Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 8 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 227).

SINGH, B. D. **Plant breeding: principles and methods**. 7th ed. New Delhi: Kalyani Publishers, 2004.

STEPHENS, J. Male sterility in sorghum: its possible utilization in production of hybrid seed. **Journal of America Society of Agronomy**, v. 29, n. 8, p. 690-696, 1937.

STEPHENS, J. C.; HOLLAND, P. F. Cytoplasmic male sterility for hybrid sorghum seed production. **Agronomy Journal**, v. 46, p. 20-23, 1954.

SCHERTZ, K. F. Male-sterility in sorghum: Its characteristics and importance. In: ODA PLANT SCIENCES RESEARCH PROGRAMME CONFERENCE, 29., 1993., Norwich, UK. **Use of molecular markers in sorghum and pearl millet breeding for developing countries: proceedings**. London: Overseas Development Administration, 1994. p. 35-37.

SCHERTZ, K. F. Possible new cytoplasmic-genic sterility systems in sorghum. In: ANNUAL CORN AND SORGHUM RESEARCH CONFERENCE, 1973. **Proceedings...** Washington: American Seed Trade Association, 1973. p. 7-14.

SCHERTZ, K. F.; RITCHEY, J. M. Cytoplasmic-genic male sterility systems in sorghum. **Crop Science**, v. 18, n. 5, p. 890-893, 1978.

SECRIST, R. R.; ATKINS, R. E. Pollen fertility and agronomic performance of sorghum hybrids with different male-sterility-inducing cytoplasm. **Journal of Iowa Academic Science**, v. 96, n. 3, p. 99-103, 1989.

TANG, H. V.; PRING, D. R. Conversion of fertility restoration of the sorghum IS1112C (A3) male-sterile cytoplasm from two genes to one gene. **Crop Science**, v. 43, n. 5, p. 1747-1753, 2003.

WEBSTER, O. J. Genetic studies in *Sorghum vulgare* (Pers.). **Crop Science**, v. 5, n. 3, p. 207-210, 1965.

WEBSTER, O. J.; SINGH, S. P. Breeding behavior and histological structure of non-dehiscent anther character in *Sorghum vulgare* pers. **Crop Science**, v. 4, n. 6, p. 656-658, 1964.

WORSTELL, J. V.; KIDD, H. J.; SCHERTZ, K. C. Relationships among male sterility inducing cytoplasm of sorghum. **Crop Science**, v. 24, n. 1, p. 186-189, 1984.

XIN, Z.; HUANG, J.; SMITH, A. R.; CHEN, J.; BURKE, J.; SATTLER, S. E.; ZHAO, D. Morphological characterization of a new and easily recognizable nuclear male sterile mutant of sorghum (*Sorghum bicolor*). **PLoS One**, v. 12, e0165195, 2017.

Literatura Recomendada

PEDERSEN, J. F.; TOY, J. J. Registration of 29 forage sorghum genetic stocks in A3 cytoplasm. **Crop Science**, v. 37, n. 4, p. 1408-1409, 1997.

PEDERSEN, J. F.; TOY, J. J. Registration of N316-N320 sorghum nuclear male-sterility genetic stocks. **Crop science**, v. 41, n. 2, p. 607-607, 2001.

Capítulo 5

Métodos de melhoramento de sorgo

*Pedro César de Oliveira Ribeiro
Crislene Vieira dos Santos
Carmela Vaz Campolina
Cícero Beserra de Menezes*

Introdução

O entendimento da constituição genética de uma planta e seu modo de reprodução são importantes para que o melhorista escolha o método de melhoramento a ser aplicado na cultura. E isso é, em grande parte, ditado pelo sistema reprodutivo da planta e pelas metas traçadas para o melhoramento genético. Dessa forma, conhecer as peculiaridades do modo de reprodução da espécie é fundamental para definir os métodos de melhoramento. O conhecimento das particularidades da polinização da espécie pode auxiliar os programas de melhoramento na produção de sementes, criação de variabilidade, seleção, escolha do método de melhoramento e comercialização de sementes (Borém et al., 2009).

A classificação de espécies cultivadas se baseia no modo de reprodução dessas. A literatura subdivide as espécies entre assexuadas e sexuadas. Neste capítulo serão destaques as espécies de reprodução sexuada, grupo ao qual pertence a cultura do sorgo, que podem ser divididas entre autógamas, alógamas e autógamas com frequente alogamia (Borém et al., 2009; Hallauer et al., 2010; Lersten 2015).

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] é uma espécie considerada de reprodução mista, com autores concordantes sobre o percentual da sua taxa de fecundação cruzada como sendo superior a 10%, dependendo das condições climáticas (Borém et al., 2014), ou variando entre 5% e 10% (Coors et al., 1999; Doggett, 1970).

O sorgo apresenta flores monoicas, com gineceu e androceu bem próximos, o que influencia na alta taxa de autofecundação (Smith; Frederiksen,

2000). Sendo assim, o melhorista pode desenvolver linhagens homozigotas, ou pode explorar heterose por meio de processos de hibridação. A definição dos objetivos do programa de melhoramento deve sempre estar clara e definida para que se obtenha sucesso. Assim, o melhorista deve entender o objetivo, o progresso, o material e conhecer o seu germoplasma.

Apesar de ser uma espécie autógama em que tradicionalmente se recomendam linhagens como cultivares, após a descoberta da macho-esterilidade genética citoplasmática (Reddy et al., 2005), a produção de híbridos de sorgo se tornou atraente e economicamente viável (Coors et al., 1999). Programas de melhoramento que utilizam macho-esterilidade se baseiam em três tipos de linhagens, denominadas A, B e R. As linhagens A e B são isogênicas e se diferem apenas quanto à fertilidade do pólen, sendo a linhagem A macho-estéril e a B macho-fértil; as linhagens R são macho-férteis e restauram a fertilidade das linhagens A. A linhagem A e a linhagem R são cruzadas para produzir o híbrido F_1 macho-fértil, e a linhagem B é cruzada com a linhagem A para manter a linhagem macho-estéril (Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016; Ribeiro et al., 2020).

Objetivos do Programa de Melhoramento de Sorgo

A cultura do sorgo pode ser classificada em seis tipos, sendo: i) o sorgo granífero, para produção de grão, que pode ser utilizado na alimentação humana e animal; ii) o sorgo forrageiro, utilizado para produção de forragem para alimentação animal, possuindo híbridos de elevada qualidade e produtividade; iii) o sorgo sacarino, que possui elevados teores de açúcares no colmo, utilizado para produção de etanol e biomassa; iv) o sorgo biomassa, que produz grande quantidade de massa verde, podendo atingir 5 a 6 metros de altura, utilizado para a cogeração de energia; v) o sorgo tipo vassoura, cuja panícula é usada para produção de vassouras artesanais, muito utilizado por pequenos produtores; e vi) o sorgo de corte e pastejo, utilizado para a alimentação animal em forma de pastejo rotativo (Doggett, 1970; Smith; Frederikson, 2000; Zhao; Dahlberg, 2019). Segundo Ribas (2003, 2008), o sorgo é uma cultura que pode ser chamada de uma "extraordinária fábrica de energia", pois possui enorme gama de utilidades. Sendo assim, os programas de melhoramento de sorgo devem estabelecer a finalidades dos híbridos que serão ofertados e os objetivos dos híbridos.

Destaca-se que os programas de melhoramento de sorgo devem ter objetivos, como maior rendimento e produtividade; resistência aos estresses

bióticos; tolerância aos estresses abióticos; características para qualidade em grãos e forragem; precocidade; insensibilidade ao fotoperiodismo; adaptabilidade e estabilidade ampla; e características agrônômicas desejáveis.

Emasculação de Sorgo

Como mencionado anteriormente, o sorgo possui flores perfeitas, ou seja, os dois órgãos reprodutivos em uma única flor. Sendo assim, para a realização de cruzamentos entre genótipos férteis devem-se realizar alguns procedimentos, como a emasculação, para que estes cruzamentos sejam eficientes.

A emasculação manual é a técnica mais utilizada pelos programas de melhoramento de sorgo. O processo se inicia ao retirar as anteras funcionais de cada flor sem prejudicar o estigma. Em seguida, seleciona-se a panícula, que tem suas flores removidas na véspera da antese. Essas flores ocorrem abaixo e dentro de cerca de 3 cm das flores abertas em uma panícula de sorgo. Por fim, todas as espiguetas abertas são removidas com uma tesoura.

Como medida de controle contra a contaminação, nas panículas, todos os equipamentos utilizados na emasculação devem ser lavados, antes e após o procedimento, para remover qualquer pólen residual, especialmente se a emasculação ocorrer ao ar livre. Todas as flores, exceto as que devem ser emasculadas, são removidas, deixando apenas as flores que devem abrir no dia seguinte.

Com uma pinça afiada, as flores são abertas, e as anteras são removidas com extremo cuidado, para não danificar o estigma (Figura 1). Deve-se ter cuidado para não quebrar a antera, e, se ela se romper, essa flor deve ser removida após a emasculação. A panícula é coberta com um saco de papel até o dia em que as flores sejam polinizadas, de um a dois dias depois, com o pólen do progenitor masculino.

Um método para controlar a deiscência das anteras é a utilização de um saco plástico para cobrir a panícula antes da floração, a fim de controlar a umidade. Este procedimento também é conhecido como emasculação de saco plástico, sendo comumente utilizado para o desenvolvimento e seleção de populações segregantes, já que permite a obtenção de muitos cruzamentos em um curto período.



Fotos: Pedro César Ribeiro

Figura 1. Processo de emascação manual, A1 e A2: remoção das flores inferiores; B1 e B2 remoção das anteras.

Normalmente os cruzamentos são feitos no campo, utilizando as plantas selecionadas como fêmeas. A abertura de flores se inicia do ápice da panícula, e em seguida essas flores são removidas, assim como as flores da parte inferior, de modo que a panícula fique com 3 a 5 cm. O próximo passo é cobrir a panícula com um saco plástico e, em seguida, com um saco polinizador, para sombrear a panícula e reduzir a temperatura sob o saco plástico. A panícula permanece coberta por dois a três dias (Figura 2), período no qual completa a sua antese. Contudo, esse método proporciona alta umidade na panícula, que pode inibir a deiscência das anteras (Figura 3).

Na sequência, o pólen do progenitor masculino é coletado, o saco plástico é removido, e a panícula é “sacudida” para remover o excesso de anteras. Com isso a polinização é feita imediatamente depois desse procedimento. Um certo nível de autopolinização ocorrerá na panícula em que foi realizado o cruzamento. Ambas as técnicas não são 100% eficazes (Rakshit; Bellundagi, 2018).



Foto: Cicero Beserra de Menezes

Figura 2. Processo de emascação com saco plástico.



Foto: Cicero Beserra de Menezes

Figura 3. Pólen e alta umidade no processo de emascação com saco plástico.

Outro processo de emascação é a emascação por tratamento com água quente. Neste caso as flores da parte inferior são removidas e aquelas da porção superior, selecionadas, são expostas a água quente (em torno de 42 °C), com um tempo de 10 minutos, tornando o pólen não funcional (House, 1985). Essas flores ficam abertas com antera exposta, sendo possível realizar a polinização com o doador, no dia seguinte (Rakshit; Bellundagi, 2018).

Técnicas de Melhoramento

O melhorista deve sempre estar atento na escolha da metodologia de melhoramento que será aplicada ao seu programa, o que depende do comportamento de polinização da cultura e do tipo de cultivar a ser desenvolvida, seja híbrido ou variedade.

Na cultura do sorgo são aplicados os métodos de melhoramento para culturas autógamas por causa da predominância de sua reprodução por autofecundação, mas também são utilizadas técnicas de melhoramento usadas em espécies alógamas, o que só foi possível por causa da descoberta das fontes de macho-esterilidade. Sendo assim, os melhoristas têm trabalhado também com métodos de melhoramento aplicados às culturas alógamas na condução de programas de melhoramento de sorgo (House, 1985; Acquaah, 2012; Rakshit; Bellundagi, 2018).

Diante da possibilidade de confecção de híbridos, torna-se possível proteger a tecnologia gerada (sementes híbridas) e explorar a heterose ou "vigor híbrido". Com isso, os programas de melhoramento de sorgo têm como base o desenvolvimento de linhagens, para a obtenção de híbridos de elevado potencial e ampla adaptabilidade aos diversos ambientes de cultivo. Dessa forma, têm-se utilizado diferentes processos de seleção clássica e esquemas de reprodução para o melhoramento do sorgo, que variam de acordo com os objetivos propostos.

Método Intrapopulacional

Seleção Massal

A seleção massal é um método aplicado normalmente para características de alta herdabilidade, como florescimento, altura de plantas e alguns tipos de resistência à doença. Isto porque este método de seleção é realizado de maneira visual, e, portanto, através de caracteres fenotípicos. Vale lembrar que as características de alta herdabilidade são comumente controladas por poucos genes, ou seja, sua expressão é pouco afetada pelo ambiente, e, dessa forma, a seleção pelo fenótipo é eficiente (Santos et al., 2005). No entanto, mesmo para essas características de alta herdabilidade o controle local deve ser realizado, de forma que as plantas estejam em condições favoráveis ao seu desenvolvimento.

Neste método um número grande de plantas fenotipicamente

semelhantes é selecionado, visando manter a variabilidade genética, e suas sementes são misturadas para constituir uma população melhorada (Carena et al., 2010; Doggett, 1968; Foster et al., 1980). Como mostrado na Figura 4, a seleção de plantas deve ser realizada de maneira aleatória, tornando a amostra de plantas representativa da população. Cada panícula individual, selecionada das melhores plantas, após ser colhida e trilhada, terá suas sementes misturadas, compondo a população melhorada (Borém; Miranda, 2013).

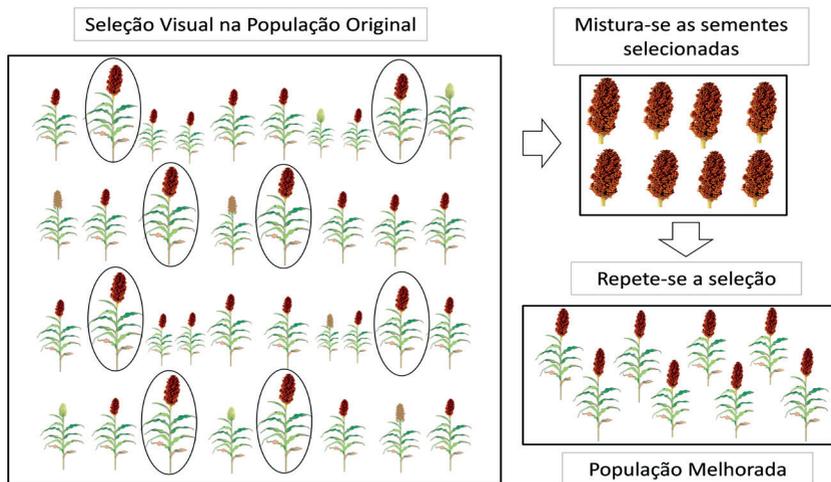


Figura 4. Representação de esquema de seleção massal em sorgo.

Uma atenção especial deve ser dada para o planejamento do campo de seleção massal. Isto porque, nas gerações iniciais de alguma população, quando ainda se está selecionando plantas individuais, o espaçamento entre plantas proposto deve evitar a competição. Ou seja, o espaçamento recomendado para a seleção massal foge da recomendação convencional, de 0,5 m entre linhas e densidade de 10 plantas por metro linear. Quando em seleção massal pode-se utilizar o espaçamento de 1 m entre linhas, e menor densidade de plantas, a fim de reduzir a competição (Borém; Miranda, 2013).

Durante a seleção massal o teste de progênies não faz parte do processo de seleção, apenas as características específicas da variável que se está selecionando são levadas em consideração. O melhorista deve direcionar a seleção para os caracteres agrônômicos que são facilmente visíveis, sempre procurando uniformidade das plantas de sorgo selecionadas, quanto ao ciclo, à altura de plantas, e à resistência às pragas e doenças.

A seleção massal é utilizada principalmente para introduções de germoplasma e purificação das variedades de linhas puras, quando estas se tornam geneticamente variáveis. Com isso, as variedades selecionadas são agronomicamente uniformes, mas ao mesmo tempo a seleção massal é mais simples e efetiva para caracteres de alta herdabilidade na cultura do sorgo, mantendo considerável variabilidade genética. A seleção massal em sorgo possui vantagens como a facilidade de condução e a possibilidade de obter mais de um ciclo por ano (Doggett, 1968; Foster et al., 1980). A desvantagem deste método é a dificuldade de identificar genótipos superiores por meio do fenótipo, por causa da variação ambiental (Gardner, 1961).

O procedimento comum para purificação de cultivares consiste em realizar a seleção de 200 indivíduos com características típicas da cultivar que se deseja purificar. Essas plantas selecionadas são trilhadas conjuntamente a fim de recuperar as características específicas da cultivar (Borém; Miranda, 2013). Contudo, este método tem suas limitações quando aplicado em espécies que realizam autofecundação, como sorgo, porque:

1. Não é possível saber se as plantas selecionadas são homozigotas ou heterozigotas. Com isso, podem ser necessários mais ciclos de seleção, para uniformizar as características desejáveis.
2. O ambiente pode afetar muito a expressão das características, e dessa forma é difícil afirmar o bom desempenho tendo por base o genótipo.
3. Os campos para a seleção devem ser alocados em regiões típicas de cultivo, onde as características que se deseja selecionar se expressem bem.
4. A seleção massal não é eficiente para características de baixa herdabilidade.

De forma geral a seleção massal é um método simples, mas eficiente, que requer baixo custo operacional, sendo esta uma das principais vantagens. Este custo é reduzido porque a mão de obra não precisa de qualquer tipo de especialização, o que torna o trabalho visual e muito simples de ser realizado (Santos et al., 2005).

Seleção de Linhas Puras

Neste método de seleção de linhas puras a seleção individual de plantas é seguida da avaliação independente de cada progênie. Diferentemente da seleção massal, onde plantas individuais são submetidas ao "teste" em

conjunto, nesta metodologia as plantas que originam progênie superiores são encaminhadas e colhidas separadamente, sem misturar as sementes.

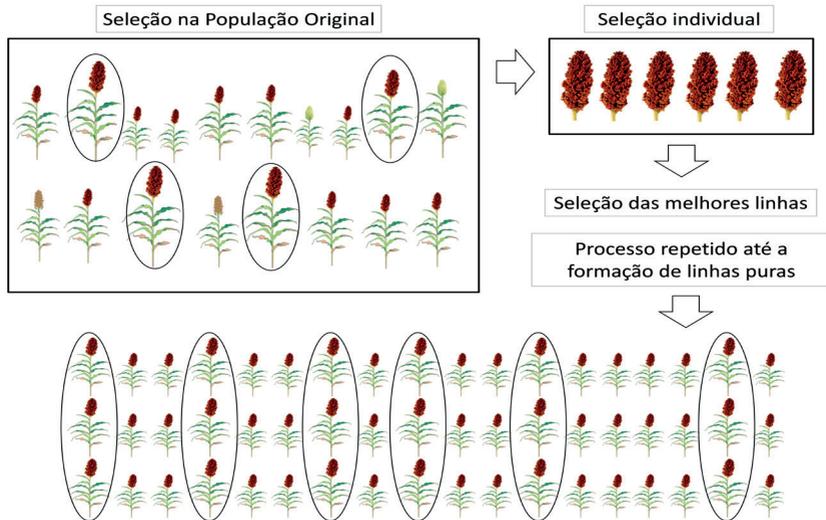


Figura 5. Representação do esquema de seleção de linhas puras.

Cada planta selecionada é colhida separadamente, e as sementes oriundas da panícula selecionada irão constituir uma progênie (Figura 5). As sementes das panículas selecionadas são distribuídas em linha, e a nova avaliação quanto ao rendimento, uniformidade e características relacionadas será feita por comparação entre as linhas. As melhores linhas de progênie com maior rendimento e caracteres desejáveis são selecionadas. Posteriormente, seu desempenho é comparado com as variedades de seleção para identificar a melhor linha como nova entrada (Rooney, 2004; Diallo et al., 2019). Dentro das progênies de plantas individuais selecionadas não haverá variação, mas entre as progênies de plantas selecionadas há variação genética.

Método do Pedigree

Os progenitores selecionados para formar o cruzamento parental inicial devem ser complementares para a característica de interesse e com alta frequência de alelos favoráveis (Ramalho et al., 2012; Cruz et al., 2014). No método de pedigree, o início de seleção das plantas individuais ocorre em F_2 , pois é essa geração que exibe maior variação genética observada (Cruz et al., 2011). Portanto, recomenda-se que o tamanho dessa população nesta

geração deve ser máximo (Figura 6). Na geração F_2 o melhorista deve iniciar as anotações de plantas individuais, registro que facilita a genealogia da planta ou o pedigree, sendo este o registro da futura linhagem.

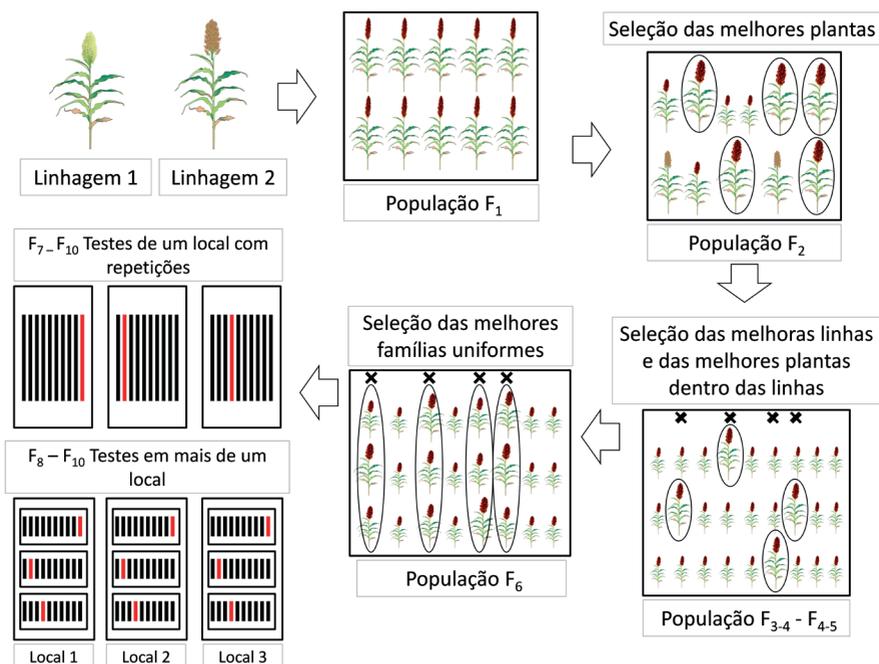


Figura 6. Representação esquema de seleção de Pedigree

Em cada geração de segregação, deve-se realizar seleção entre famílias e dentro das famílias, selecionando plantas individuais, até que se tornem homocigotas. Simultaneamente à seleção, as progênies são testadas e avaliadas quanto ao seu desempenho. Com base no desempenho das progênies, as plantas superiores que produzem boas progênies são conduzidas por autofecundação e colhidas separadamente. Nas primeiras gerações (F_3 , F_4 e F_5), a seleção é praticada dentro e entre as famílias, mas nas gerações posteriores (F_6 e F_7) a seleção é principalmente entre famílias e não dentro das famílias, pois dentro de cada linha as progênies se tornam uniformes, já que a autofecundação gera o aumento da homocigose na progênie selecionada. O método genealógico é um método comumente empregado no melhoramento do sorgo, e muitas variedades atuais são resultados desse método.

Método Bulk

O método Bulk é também conhecido como método de população ou método massal de melhoramento de plantas (Borém et al., 2009). Nas gerações segregantes (F_2 a F_6), as plantas são selecionadas em conjunto, formando um “bulk” de sementes. Este “bulk” de sementes das plantas selecionadas é seguido por várias gerações e, no final do agrupamento, as plantas individuais são selecionadas com base no desempenho de sua progênie e são colhidas separadamente (Figura 7).

As plantas individuais selecionadas são avaliadas como no método de reprodução genealógica. Essas plantas selecionadas formam as parcelas que serão avaliadas com repetições, e, subseqüentemente, as famílias superiores selecionadas são submetidas a uma avaliação em mais locais (Figura 7).

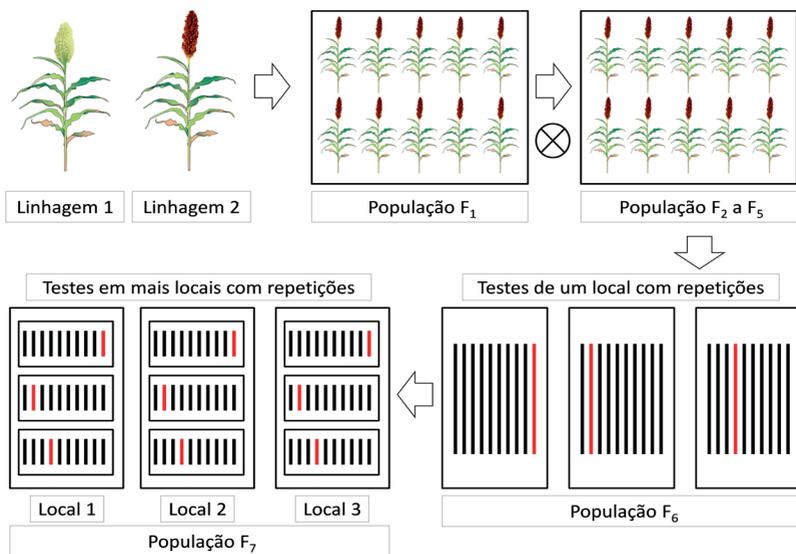


Figura 7. Representação esquema de seleção Bulk e SSD.

Método SSD – *Single Seed Descent*

O método SSD é a modificação do método de seleção massal, sendo muito popular entre as diversas culturas, por causa da sua praticidade e utilidade (Borém et al., 2009). Os principais objetivos deste método incluem o avanço da máxima variação genética entre as linhagens cruzadas, a fim de obter a população segregante, além de atingir rapidamente o nível de

homozigose desejado. O avanço das gerações ($F_2:F_5$) pode ser realizado fora de épocas de plantios da cultura do sorgo ou em casas de vegetação, pois nesta fase ocorre apenas o avanço das gerações com uma única semente por planta, sem a necessidade de avaliação.

O método SSD consiste em, a partir de uma planta F_2 , colher uma única semente por panícula (semente F_3). Essa semente F_3 colhida é misturada com a de outras plantas, constituindo a geração F_3 . Entretanto a semente dessa geração consiste em semente F_4 . Esse processo se repete até as progênies $F_{5,6}$, quando as progênies já estão uniformes. A partir dessa geração, as panículas individuais são colhidas e avaliadas em ensaios iniciais em um local. As progênies selecionadas após essa geração são avaliadas em mais locais ou usadas em cruzamentos testes.

A principal vantagem deste método é a representação de cada planta F_2 no final da população, permitindo assim ao melhorista maior representação de variância genética máxima do cruzamento. Dessa maneira, este método se torna mais econômico que os demais, porque requer menor espaço e tempo, mão de obra e recursos. No entanto, dentre as desvantagens está a perda de planta única, que pode levar à redução na variabilidade e pequena ou nenhuma oportunidade de seleção nas gerações iniciais.

Método de Retrocruzamento

O método de retrocruzamento é utilizado para melhorar características específicas em linhagens ou cultivares já pertencentes ao programa de melhoramento de sorgo, quando estas apresentam uma ou algumas características indesejáveis. E, neste caso, um exemplo a ser citado é a introdução da resistência a doenças, pragas e patógenos, dentre outras características controladas por poucos genes.

O método de retrocruzamento foi proposto por Harlan e Pope (1922), inicialmente na cultura da cevada. Esta metodologia consiste em substituir o alelo indesejável da linhagem receptora, ou seja, uma linhagem já pertencente ao programa de melhoramento de sorgo (linha de elite), pelo alelo desejável de uma outra linhagem doadora. A linhagem doadora é um genótipo de origem identificada, com expressão de alto nível da característica que se deseja repassar à linhagem receptora.

A progênie F_1 obtida pelo cruzamento das linhagens receptora e doadora é repetidamente retrocruzada com a linhagem receptora para substituir os alelos das linhagens doadoras por alelos da linhagem receptora,

objetivando no final recuperar o genótipo da linhagem receptora com as novas características desejáveis.

Durante a transferência do segmento de genoma desejado para o pai recorrente, algum fragmento indesejado do genoma do pai doador também é transferido, o que é referido como arrasto de ligação. Para reduzir o arrasto de ligação, mais números de eventos de recombinação são necessários para isolar a linha com traços indesejáveis reduzidos e mais semelhantes ao pai receptor na maioria dos traços, exceto traço-alvo (Figura 8). Como mostrado na Figura 8, na medida em que são realizados os retrocruzamentos, a linhagem receptora vai sendo purificada, até que em RC_4 o grau de similaridade entre as linhagens recorrente (receptora) e doadora é menor que 5%.

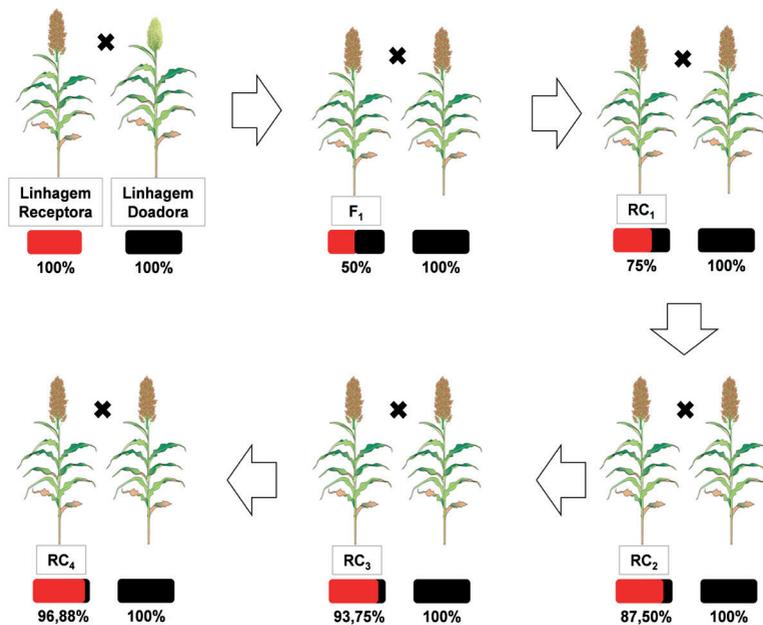


Figura 8. Representação esquema de retrocruzamento.

O método de retrocruzamento conserva todos os caracteres favoráveis da cultivar-elite junto com o traço desejado da linha do doador. Em cada geração de retrocruzamento, a seleção é feita para a característica-alvo e desempenho das plantas semelhante a caracteres parentais recorrentes. Esta metodologia pode ser potencializada com uso de marcadores moleculares e seleção assistida, exemplo de trabalhos desenvolvidos pelo Programa de

Melhoramento de Sorgo da Embrapa é a seleção assistida por marcadores para os genes de tolerância ao alumínio (Alt_{SB}) e baixo teor de lignina ($bmr6$) (Silva et al., 2020; Magalhães et al., 2013; Oliveira et al., 2010).

O Programa de Melhoramento de Sorgo da Embrapa realizou a incorporação do alelo $bmr6$ em linhagens-elites de sorgo biomassa, visando melhorar a qualidade da biomassa para uso como forragem para alimentação animal ou produção de bioenergia (etanol celulósico, biogás, bióleos, etc.). Foram conduzidos dois programas de retrocruzamento separadamente, em que a linhagem CMSXS170 foi a doadora do alelo $bmr6$ e as linhagens CMSXS652 e IS23777 foram as recorrentes. Através de marcadores moleculares específicos para o alelo $bmr6$, foi empregada a seleção assistida para a característica nervura-marrom nas gerações RC1F1 e RC2F1. Adicionalmente, utilizaram-se marcadores SNPs polimórficos e distribuídos ao longo do genoma do sorgo para acelerar a recuperação do genoma recorrente. Foram obtidas linhagens novas de sorgo biomassa com o alelo $bmr6$ com pouco menos de dois anos, mostrando que os marcadores SNPs foram eficientes na identificação de indivíduos com mais de 99% da proporção de recuperação do genoma recorrente (Silva et al., 2020). No sorgo, o retrocruzamento também é muito aplicado para incorporar o gene da macho-esterilidade citoplasmática em linhagens mantenedoras (B), visando o desenvolvimento de linhagens macho-estéril (A) utilizadas como fêmeas na obtenção de híbridos em escala comercial (Reddy et al., 2005; Silva et al., 2020).

Melhoramento Populacional

O melhoramento populacional se refere a uma técnica para isolar indivíduos (genótipos) superiores para serem usados como população de inter cruzamento e sintetizar uma população-base, aumentando a frequência de genes e alelos favoráveis na população (Menezes et al., 2019; Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016). O melhoramento populacional envolve seleção recorrente, na qual as plantas são selecionadas com base no desempenho geral (seleção em massa) ou desempenho das progênes (seleção de progênes) (House, 1985), resultando em uma fonte contínua de novas entradas no programa de seleção.

Como o sorgo é uma cultura que se reproduz predominantemente por autofecundação, o acasalamento aleatório na população é garantido usando o sistema de macho-esterilidade genética do recessivo ($msms$) (Menezes et al.,

2019; Parrella et al., 2016; Schaffert et al., 2016). Existem alguns genes de macho-esterilidade genética relatados em sorgo (ms_1 ao ms_8) (Reddy et al., 2005). E, com isso, grande parte dos programas de melhoramento de sorgo utiliza o gene ms_3 no desenvolvimento de populações. Esta técnica com o uso da macho-esterilidade genética facilita o processo de hibridação da cultura, evitando o trabalho dispendioso da emasculação, entretanto alguns cuidados durante a antese das plantas são de extrema importância.

Os doadores a serem incorporados na população são cruzados com as linhas ms_3ms_3 . Os F_1 s (férteis) são autofecundados, em razão da presença dos genes Ms_3ms_3 em heterozigose, sendo necessária uma geração de autofecundação para que os genótipos ms_3ms_3 possam se expressar. As plantas que formam a geração F_2 são usadas para um retrocruzamento, ou destinadas ao primeiro ciclo de recombinação em campo isolado. Identificam-se as F_2 macho-estéreis durante o florescimento, que são colhidas separadamente. Em seguida, cada panícula é separada e misturada, em igual número de sementes, dando origem à segunda geração de recombinação, processo que é repetido até a terceira geração, quando a proporção de plantas férteis e de estéreis se aproxima de 1:1.

Um esquema de desenvolvimento de população-base de sorgo sacarino foi realizado por meio de ciclos de seleção recorrente (Figura 9). Neste caso, o primeiro passo foi realizar o cruzamento entre a fonte de macho-esterilidade (ms_3ms_3) e as linhagens R, com altos teores de açúcar. Na sequência, a geração F_1 gerada é autofecundada, dando origem à geração F_2 , que é retrocruzada novamente com a recorrente (linhagem R). Em seguida, inicia-se o primeiro ciclo de recombinação, em que são colhidas panículas macho-estéreis, formando um bulk, levado à próxima geração. Por fim, na terceira geração de recombinação, a proporção entre plantas férteis e estéreis está na dimensão desejada de 1:1.

O programa de melhoramento genético do sorgo da Embrapa desenvolveu uma população-base com linhagens restauradoras de fertilidade (R) de sorgo sacarino (Parrella et al., 2016). Após o desenvolvimento da população-base (ciclo 0), foram selecionadas 196 progênies macho-estéreis com base no teor de sólidos solúveis que foram semeadas e avaliadas individualmente em campo em dois ambientes (Lavras-MG e Sete Lagoas-MG). Houve variação genética entre as progênies de meios-irmãos para todos os caracteres agronômicos e tecnológicos estudados, expressando a existência de variabilidade genética na população. Com base nos resultados

obtidos foram selecionadas as 40 melhores progênies pela variável toneladas de Brix por hectare para proceder a nova etapa de recombinação a fim de constituir a população do ciclo 1. Posteriormente, foram tomadas aleatoriamente 40 progênies de meios-irmãos de cada ciclo (ciclos 0 e 1), as quais foram avaliadas em Lavras e Sete lagoas a fim de estimar o progresso genético. O progresso genético obtido foi de 1,17% para a característica dias para florescimento (FLOR), 3,73% para altura de plantas (AP), 8,04% para produção de massa verde (PMV), 0,24% para sólidos solúveis totais (SST) e 8,65% para toneladas de Brix por hectare (TBH) (Leite et al., 2020).

Testcross

Griffing (1956) foi um dos responsáveis pelo desdobramento da capacidade de combinação dos cruzamentos, em capacidade geral de combinação (CGC) e capacidade específica de combinação (CEC). Isso possibilitou a compreensão e aplicação da técnica de testcross, como uma etapa final do melhoramento de sorgo, onde se realiza o desenvolvimento de uma linhagem parental para compor o cruzamento de híbridos. Com isso, após as novas linhagens parentais serem desenvolvidas, a próxima etapa do processo é a avaliação dos seus respectivos híbridos.

Vencovsky (1970) ressalta que a CGC se relaciona com a performance média de um genitor em uma série de cruzamentos híbridos, sendo esta associada à ação aditiva dos genes. Já a CEC trata do comportamento de um cruzamento híbrido específico, sendo esta capacidade associada aos efeitos da dominância, podendo ser utilizada como um indicador da variabilidade presente entre cruzamentos. Dessa forma, um dos objetivos do programa de melhoramento de sorgo é encontrar combinações híbridas com maior capacidade específica de combinação, e que estas envolvam pelo menos um dos progenitores com alta CGC (Cruz et al., 2012; Ramalho et al., 2012).

O princípio de aplicação do testcross é de que cada nova linhagem parental, seja ela restauradora (linhagem R) ou macho-estéril (linhagem A), deve ser testada com linhagens-elites, denominadas de testadores. Novas linhagens restauradoras são cruzadas com duas ou três linhagens-elites A, já conhecidas pelo melhorista, com características agrônômicas desejáveis e boa produção de sementes. De maneira simultânea novas linhagens A são cruzadas com dois ou três linhagens-elites R, também com características agrônômicas desejáveis e ótima produção de pólen. As linhagens A serão as linhagens produtoras de sementes híbridas, e as linhagens R serão as

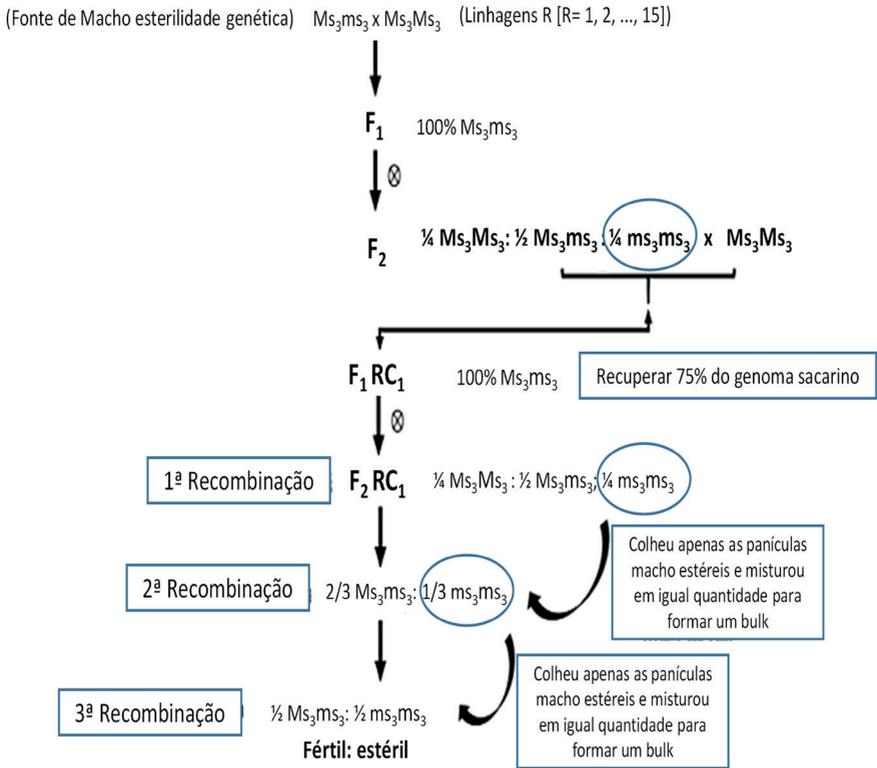


Figura 9. Esquema de desenvolvimento de população-base de sorgo sacarino por meio de ciclos de seleção recorrente.

Adaptado de Parrella et al. (2016).

linhagens fornecedoras de pólen em campos de produção de sementes, conforme relatado em capítulo deste livro. Portanto, tanto as linhagens-élites já desenvolvidas quanto também as novas linhagens em cruzamentos testcross devem possuir características de alto desempenho agrônomico.

Estes testcrosses são avaliados com um mínimo de três a quatro locais de teste, em regiões geográficas distintas (Zhao; Dahlberg, 2019). O desempenho dos híbridos topcrosses é comparado, em termos de produtividade, ciclo e outros caracteres, com híbridos-testemunhas (híbridos comerciais), no intuito de se encontrar novos híbridos que poderão ser lançados, de acordo com o plano estratégico de mercado da empresa. Os híbridos selecionados serão avançados e testados em mais ambientes.

Apesar na necessidade de teste em outros locais para validação de desempenho e indicação de zoneamento de risco para os híbridos, uma das vantagens é que, nos estágios iniciais de desenvolvimento da linha parental, há possibilidade de conduzir plantios fora de época em casa de vegetação. Vale ressaltar o ganho de tempo, pela viabilidade de realizar duas ou três gerações por ano para operações como a esterilização das linhagens B, durante o processo de transferência da macho-esterilidade.

As novas linhagens parentais A ou R, que exibiram bom desempenho em cruzamento com os vários testadores, de forma geral, apresentam alta capacidade de combinação geral (CGC). Já as novas linhagens parentais, A ou R, que exibirem desempenho em cruzamento específico com algum testador, apresentam potencial alto de capacidade específica de combinação (CEC).

As novas linhagens parentais, que mostraram maior tendência a CGC são cruzadas em um painel de linhas-elite adicionais, para gerar novos híbridos F_1 . Contudo, as linhagens que apresentaram CEC com um testador específico devem ter seu cruzamento avaliado em mais locais, verificando assim o potencial deste cruzamento híbrido, que precisa passar por testes mais intensivos.

Referências

ACQUAAH, G. Breeding sorghum. In: ACQUAAH, G. **Principles of plant genetics and breeding**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. p. 617-628.

AXTELL, J.; KAPRAN, I.; IBRAHIM, Y.; EJETA, G.; ANDREWS, D. J. Heterosis in sorghum and pearl millet. In: GENETICS and exploitation of heterosis in crops. Madison: Crop Science Society of America, 1999. p. 375-386.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 523 p.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. **Sorgo: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. 275 p.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 529 p.

CARENA, M. J.; HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B. Quantitative genetics in maize breeding. In: CARENA, M. J.; HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B. **Selection: experimental results**. New York: Springer, 2010. p. 291-382.

COORS, J. G. Selection methodology and heterosis. In: COORS, J. G.; PANDEY, S. (ed.). **Genetics and exploitation of heterosis in crops**. Madison: ASA: Crop Science Society of American, 1999. p. 225-245.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. v. 1, 480 p.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria aplicada ao estudo de diversidade genética**. Visconde de Rio Branco, MG: Suprema, 2011.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2012.

DIALLO, C.; RATTUNDE, H. F. W.; GRACEN, V.; TOURÉ, A.; NEBIÉ, B.; LEISER, W.; SIDIBÉ, B. Genetic diversification and selection strategies for improving sorghum grain yield under phosphorous-deficient conditions in West Africa. **Agronomy**, v. 9, n. 11, article 742, 2019.

DOGGETT, H. Mass selection systems for sorghum, *Sorghum bicolor* (L.) moench. **Crop Science**, v. 8, n. 3, p. 391-392, 1968.

DOGGETT, H. **Sorghum**. London: Longmans, Green, 1970.

FOSTER, K. W.; JAIN, S. K.; SMELTZER, D. G. Responses to 10 cycles of mass selection in an inbred population of grain sorghum. **Crop Science**, v. 20, n. 1, p. 1-4, 1980.

GARDNER, C. O. An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yield of corn. **Crop Science**, v. 1, n. 4, p. 241-245, 1961.

HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B.; CARENA, M. J. **Breeding plans. quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. p. 577-653.

HARLAN, H. V.; POPE, M. N. The use and value of back-crosses in small-grain breeding. **Journal of Heredity**, v. 13, n. 7, p. 319-322, 1922.

HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. Patancheru: ICRISAT, 1985.

LEITE, P. S. da S.; BOTELHO, T. A.; RIBEIRO, P. C. de O.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C.; NUNES, J. A. R. Intrapopulation recurrent selection in sweet sorghum for improving sugar yield. **Industrial Crops and Products**, v. 143, article 111910, 2020.

LERSTEN, N. R. **Reproduction and seed development. hybridization of crop plants**. Madison: American Society of Agronomy: Crop Science Society of America, 2015.

MAGALHÃES, J. V.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E. **Melhoramento molecular da tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 90).

MENEZES, C. B.; OLIVEIRA, I. C. M.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. C.; SCHAFFERT, R. E. **Uso da macho-esterilidade no melhoramento genético de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 16 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 255).

OLIVEIRA, B. C. F. S.; MOURA, P. M. A.; MACIEL, B. H.; GUIMARÃES, C. T.; CANIATO, F. F.; FONSECA JÚNIOR, S. C.; JARDIM, S. N.; MAGALHÃES, J. V. **Utilização de marcadores moleculares na seleção assistida para tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 155).

PARRELLA, R. A. da C.; SCHAFFERT, R. E.; LEITE, P. S. da S.; NUNES, J. A. R.; MENEZES, C. B. de; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, N. N. L. D. **Desenvolvimento de populações de sorgo sacarino de cruzamento ao acaso para seleção recorrente intrapopulacional**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 217).

RAKSHIT, S.; BELLUNDAGI, A. Conventional breeding techniques in sorghum. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (Ed.). **Breeding sorghum for diverse end uses**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 77-91.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2012. 522 p.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. In: JANICK, J. (Org.). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley & Sons, 2005. v. 25, p. 139-172.

RIBAS, P. M. Importância econômica. In: RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Cultivo do sorgo**. 4. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 2).

RIBAS, P. M. **Sorgo**: introdução e importância econômica. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 26).

RIBEIRO, P. C. de O.; MARÇAL, T. de S.; OLIVEIRA, I. C. M.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, A. B. de; PARRELLA, R. A. da C. Insight into genetic potential of male sterile sweet sorghum A-lines for agroindustrial traits using tester R-lines. **Industrial Crops and Products**, v. 153, 112577, 2020.

ROONEY, W. L. Sorghum improvement-integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in Agronomy**, v. 83, n. 10, p. 37-109, 2004.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento do sorgo. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 429-466.

SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S.; PARRELLA, R. A. da C.; MENEZES, C. B. de. **Síntese e melhoramento de populações de intercruzamento para aumentar recombinação genética e facilitar seleção recorrente em sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 8 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 227).

SILVA, M. J.; DAMASCENO, C. M. B.; GUIMARÃES, C. T.; PINTO, M. O.; BARROS, B. A.; CARNEIRO, J. E. S.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. C. Introgression of the bmr6 allele in biomass sorghum lines for bioenergy production. **Euphytica**, v. 216, n. 6, article 95, 2020.

SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum**: origin, history, technology, and production. New York: John Wiley & Sons, 2000. v. 2.

VENCOVSKY, R. **Alguns aspectos teóricos e aplicados relativos a cruzamento dialélicos de variedades**. 1970. 59 f. Tese (Livre-Docencia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1970.

ZHAO, Z.-Y.; DAHLBERG, J. A. **Sorghum**: methods and protocols. New York: Springer, 2019. 281 p.

Capítulo 6

Esquemas e metodologias de desenvolvimento na obtenção de linhagens e híbridos de sorgo

Cicero Beserra de Menezes
Claudio Prates Zago
Jurandir Pereira Segundo
Geraldo Afonso Carvalho Jr.
Paulo Mota Ribas

Introdução

No Brasil praticamente cem por cento das cultivares comerciais de sorgo granífero são híbridos simples, oriundos do cruzamento de uma linhagem macho-estéril A e uma linhagem restauradora da fertilidade R. Para sorgo do tipo forrageiro (silagem ou pastejo), em que a uniformidade não é tão importante, híbridos simples modificados e triplos têm sido testados mas, normalmente, se mostram desuniformes (Menezes et al., 2015; Rodrigues et al., 2015).

A noção de grupos heteróticos é amplamente difundida em milho, o inter cruzamento entre distintos grupos resulta em incremento na heterozigose e geração de híbridos superiores (Heerwaarden et al., 2012). Tal agrupamento heterótico existe originalmente em sorgo, pela divisão das linhagens em A/B e R (linhagem “A” – macho-estéril; linhagem “B” – mantenedora de A e linhagem R – Restauradora), mas esta classificação é mais exata se feita através de técnicas de biologia molecular (Silva et al., 2021).

A macho-esterilidade citoplasmática foi descoberta em sorgo na raça *Durra*, numa variedade chamada Milo, e na raça *Kafir* encontraram-se genes mantenedores da fertilidade. Assim, os primeiros híbridos desenvolvidos foram dos cruzamentos das raças *Kafir* como linhagens fêmeas (A/B) (Stephens; Holland, 1954; House, 1985). Hoje, essa situação se apresenta mais complexa, com o desenvolvimento de linhagens A/B também em outras raças, dificultando a separação das linhagens em grupos heteróticos somente pela característica de restauração da fertilidade (Silva et al., 2021).

O objetivo final dos programas de melhoramento é o desenvolvimento de linhagens que sejam capazes de maximizar a heterose e gerar híbridos com maior produtividade, com adaptação a diferentes ambientes climáticos, diferentes sistemas de produção, pragas e doenças, e com qualidade nutricional do grão e da forragem.

Frequentemente ocorrem surpresas em que o aparecimento ou a intensificação de algum fator biótico ou abiótico impõe criação de programas especiais e emergenciais, como a chegada de novas pragas ou doenças. Fato recente é o surgimento do ataque de pulgão da cana-de-açúcar (*Melanaphis sacchari*) no sorgo (Mendes et al., 2020), fazendo com que os programas de melhoramento direcionem seus esforços para desenvolver cultivares resistentes.

São muitas as dúvidas que surgem no planejamento de um programa de melhoramento, principalmente aqueles mais novos. E como em tantas outras áreas, não existe receita de bolo pronta a seguir. No entanto, pode-se utilizar da experiência de programas mais tradicionais e adaptá-los à estrutura física e ao pessoal existentes, pois estes são os limitantes de todo programa de melhoramento. As primeiras dúvidas que surgem são: Quantos cruzamentos fazer para gerar variabilidade e selecionar progênies? Quantas progênies avaliar e quantas avançar? Quantos cruzamentos fazer e quantos híbridos avançar? No Capítulo 8 do livro “Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas” (Ramalho et al., 2012) algumas destas dúvidas são discutidas.

O objetivo deste capítulo é sugerir um programa tradicional de melhoramento, para servir de base para novos melhoristas, de forma que se possa replicar ou ampliar de acordo com a estrutura física e mão de obra disponível em cada empresa.

Nos bancos de germoplasma de sorgo existem milhares de linhagens disponíveis para uso pelos melhoristas (Venkateswaran et al., 2019). Entretanto, cada programa possui capacidade de avaliação de um número limitado de populações. Há, portanto, a necessidade de seleção destas populações, a qual deve ser bem criteriosa para não haver dispêndio de tempo e recursos do programa.

Assim, serão apresentados dois exemplos de esquemas e organização de programas, baseados no método de pedigree modificado. No primeiro caso, inicia-se com um *número maior de populações*, em que se realiza nas primeiras gerações *seleção intensa entre populações*. No segundo, inicia-se

com um *número menor de populações* e realiza-se *seleção intensa dentro* da população.

Metodologia de Seleção para Grande População Inicial e Seleção Intensa entre Populações

No exemplo a seguir, será considerada a realização de 100 cruzamentos $B \times B$ ou $R \times R$ (dialelo parcial do cruzamento de 15 genótipos entre si). O avanço das populações $B \times B$ são mais difíceis e consomem mais tempo, por causa da necessidade de esterilização das linhagens B , não sendo possível para um programa de porte pequeno realizar anualmente. No caso das populações $R \times R$, a realização desta quantidade de cruzamentos anuais se torna possível e pode dar grande incremento ao programa.

As populações $B \times B$ devem ser avançadas em pedigree desde F_2 . As populações $R \times R$ podem ser avançadas em bulk até F_4 , e, após isso, autofecundadas (Tabela 1, 2 e 3). Nas gerações iniciais, é realizada intensa seleção entre as populações, sendo obtidas somente 30 progênies F_3 por população, oriundas de 100 cruzamentos. Neste modelo são recomendados dois locais simultâneos de avaliação da geração F_2 , em estações com alguma diferença ambiental entre elas. As gerações F_1 e F_2 geralmente são obtidas em casa de vegetação (vasos ou canteiros), e a partir daí tudo pode ser realizado no campo, tentando sempre evitar épocas muito frias e chuva na colheita das sementes.

House (1985) cita algumas decisões a serem organizadas antes de se iniciar um bloco de cruzamento: Quantas sementes são necessárias na geração F_1 ? Quantas sementes são obtidas por cruzamentos? Qual a diferença de florescimento entre as linhagens do bloco de cruzamento (e, sabendo disso, quantas datas de semeadura são necessárias para cada linhagem)? Quantos dias de intervalo deve haver entre as datas de semeadura, e quais são as relações entre as entradas? Seguindo este raciocínio, o autor cita alguns exemplos a serem seguidos para auxiliar nestas decisões.

Suponha que um experimento de híbridos esteja sendo planejado para três locais. Cada ensaio terá quatro repetições, com parcelas de quatro fileiras de 5 m de comprimento e espaçamento de 10 cm entre plantas. Existem três locais \times quatro repetições \times quatro linhas = 48 linhas no total. Com plantas a cada 10 cm, em uma linha de 5 m, haverá 50 plantas por linha, ou 50 plantas \times 48 linhas totalizando 2.400 plantas no total (House, 1985).

Para efeitos de estimativas de sementes, considerar:

- 1.000 sementes = 25 g
- 1 panícula = 20 g

Assim, $2.400 \times 25\text{g} / 1000 = 60\text{ g}$ de sementes são necessárias, se a germinação for 100% e uma planta por cova for necessária. A germinação nunca é 100%; se a porcentagem de germinação não for conhecida, geralmente é seguro assumir 50%. Portanto, são necessários cerca de 120 g de sementes por cruzamento. Considerar que uma panícula estéril produz cerca de 30 g a 40 g de semente, mas por segurança é melhor estimar 20 g. Assim, para se obter 120 g de semente, recomenda-se polinizar pelo menos seis plantas (House, 1985).

Tabela 1. Sugestões de estratégias a serem usadas no melhoramento de sorgo, considerando 100 cruzamentos/ano.

Gerações	Número de plantas	Tamanho da parcela
F ₁	3/cruzamento	3 vasos/cruzamento
F ₂	320/população	8 fileiras de 4 m
F ₃	30/população	1 fileira de 4 m
F ₄	1 a 20/família selecionada	1 fileira de 4 m
F _{4:5}	10 a 30/família selecionada	1 fileira de 4 m
F _{4:6}	1 a 30/família selecionada	2 fileiras de 4 m

Adaptado de Ramalho et al. (2012).

Tabela 2. Modelo esquemático do processo de desenvolvimento de linhas A/B

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
1	1	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de F_1s - Cruzamentos manuais de $B \times B$ - 300 vasos 	100 Cruzamentos entre linhas B	<ul style="list-style-type: none"> - Casa de vegetação - 2 a 3 plantas/cruzamento
				
1	2	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundação dos F_1s - 100 fileiras 	100 Populações $B \times B$	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de dois metros/população - Proteger plantas no florescimento - Avançar 80% - Canteiro em casa de vegetação
				
2	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_2s - Locais: 2 - 1280 fileiras - Colheita de semente 720 $F_{2:3}$ 	80 Populações em F_2	<ul style="list-style-type: none"> - Polinização aberta - 8 fileiras de 4 m/população \cong 300 plantas - Inserir testemunha para sanidade e ciclo. - Selecionar 90% das populações (10 plantas/população)
				
2	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação e seleção de $F_{2:3}$s - Locais: 2 - 1440 fileiras - Colheita de semente $F_{2:4}$ 	720 Progênes em F_3	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileiras de 4 m/progênie - Seleção entre (17,5%) e dentro (5%)* - Autofecundar 2 plantas/progênie selecionada
				

Continua...

Tabela 2. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
3	1	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação e seleção de $F_{3,4}s$ - Locais: 1 - Colheita de sementes $B F_{2,5}$ - Testercrosses $(B) \times 2$ testadores $R (A_3)$ - Colheita 500 híbridos $R (A_3) \times B$ 	250 Progênie em F_4 250×2 Testadores = 500 híbridos	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de 4 m/ progênie - Autofecundar B - Selecionar 1 planta por progênie B - Plantar B e R em área separada - 1 fileira de 4 m/ progênie B - 50 fileiras de 4 m/ linhagem R - Usar R macho-estéril com citoplasma A_3 para não necessitar emasculação** - Cada B polinizar quatro plantas R, para produzir híbridos testercrosses.
3	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação de híbridos testercrosses - Locais: 2 	500	<ul style="list-style-type: none"> - Parcela de 2 linhas de 3 m - 2 repetições - Inserir pelo menos 2 testemunhas comerciais - Seleção de 60% das linhagens, com base o desempenho dos híbridos
4	1	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamentos linhagem $A \times B F_{2,5}s$ - Autofecundação de B - Colheita de sementes $F_1 A / B$ - Colheita de sementes $F_{2,6} B$ 	150 Progênie em F_5	<ul style="list-style-type: none"> - Linhagens selecionadas com base nos ensaios de competição dos testercrosses serão esterilizadas - Linhagem A macho-estéril em citoplasma A_1, com pedigree próximo da linhagem B. - 1 fileira de 2 m/progênie

Continua...

Tabela 2. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
4	2	- RC _{1,2} Linhagem A × B F _{2,6} (retrocruzamento) - Avanço B (Autofecundação) - Colheita de sementes RC _{1,2} A / B - Colheita de sementes F _{2,7} B	150 Pares em (ARC ₁ × B F ₆ s)	- Autofecundar 2 plantas por linhagem B - Polinizar 3 plantas da linhagem A - 1 fileira de 2 m/progênie - Realizar seleção entre e dentro de progênie (80%)
				
5	1	- RC _{2,2} Linhagem A × B F _{2,7} (retrocruzamento) - Avanço de geração B F _{2,7} (Autofecundação) - Colheita de sementes RC _{3,2} A / B - Colheita de sementes F _{2,8} B	120 Pares em (ARC ₂ × B F ₇ s)	- Autofecundar 2 plantas por linhagem B - Polinizar 3 plantas da linhagem A - 1 fileira de 2 m/progênie - Realizar seleção entre e dentro de progênie
				
5	2	- RC _{3,2} Linhagem A × B F _{2,8} (retrocruzamento) - Avanço B (Autofecundação) - Colheita de sementes RC _{4,2} A / B - Colheita de sementes F ₉ B	100 Pares em (ARC ₃ × B F ₈ s)	- Autofecundar 2 plantas por linhagem B - Polinizar 3 plantas da linhagem A - 1 fileira de 2 m/progênie - Realizar seleção entre e dentro de progênie (80%)
				
6	1	- RC _{4,2} Linhagem A × B F _{2,9} (retrocruzamento) - Avanço B Autofecundação - Colheita de sementes RC _{5,2} A / B - Colheita de sementes F _{2,10} B	80 Pares em (ARC ₄ × B F ₉ s)	- Autofecundar 2 plantas por linhagem B - Polinizar 3 plantas da linhagem A - 1 fileira de 2 m/progênie - Realizar seleção entre e dentro de progênie (60%)

Continua...

Tabela 2. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
6	2	<ul style="list-style-type: none"> - RC_{5,2} Linhagem A × B F₁₀ (retrocruzamento) - Avanço de geração B F₁₀ (Autofecundação) - Colheita de sementes RC_{6,2} A / B - Colheita de sementes F₁₁ B - Testcrosses A × R 	<p style="text-align: center;">50 Pares em (ARC₅ × B F₁₀s)</p> <p>50 × 5 (Testador) = 250 híbridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de 2 m/progênie - Plantar A e R em área separada do avanço A / B - 1 fileira de 2 m por progênie A - polinizar 15 plantas com cada R - 20 fileiras de 2 m por progênie R
				
7	1	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação de híbridos - Testcrosses A × R - Locais: 4 	250	<ul style="list-style-type: none"> - Parcela de 2 linhas de 5 m - 3 repetições - Inserir 2 testemunhas comerciais. - Avançar 10% das linhagens com base nos resultados dos testcrosses
				
7	2	-Síntese de novas populações com as linhagens-elites do programa para novo ciclo de seleção.	<p style="text-align: center;">05 Pares de linhagens A × B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplicar linhagens selecionadas a partir da semente genética obtida na geração anterior.

* Estas porcentagens podem variar dependendo do desempenho das famílias. O importante é não realizar seleção muito severa, de forma a afetar a variabilidade das populações. Programas com estrutura maiores podem realizar seleção mais branda.

** Caso não se tenha no programa linhagem-elite R em citoplasma A₃ é recomendável realizar os cruzamentos testes de B em F_{2;5} ou F_{2;6}.

Tabela 3. Modelo esquemático do processo de desenvolvimento de linhas R

Ano	Safra	Operações	Número	Observações
1	1	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de F_1s - Cruzamento manual $R \times R$ 	100 Cruzamentos entre linha R	<ul style="list-style-type: none"> - Casa de vegetação, vaso ou canteiro - 3 vasos, com 3 plantas de cada parental (300 vasos) ou 1 fileira de 2m no canteiro (100 fileiras)
				
1	2	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundação dos F_1s 	100 populações $R \times R$	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de dois metros/população - Proteger plantas no florescimento - Avançar 80%
				
2	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_2s - Colheita de sementes F_3 	80 populações em F_2	<ul style="list-style-type: none"> - Polinização aberta - 8 fileiras de 4 m/população \cong 320 plantas - Inserir linhagem conhecida como testemunha para sanidade e ciclo. - Selecionar 90% das populações (20 plantas/população) - Plantas altas e ciclo muito longo
				
2	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação dos F_3s - Avanço de geração F_4 (polinização aberta) - Locais: 2 - 2800 fileiras 	1.400 progênies em F_3 (\cong 20/população)	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de 4 m/ progênie - Seleção entre (15%) e dentro (5%)* - Colher 2 plantas/progênie selecionada
				

Continua...

Tabela 3. Continuação

Ano	Safra	Operações	Número	Observações
3	1	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamento $F_4 \times 2$ Testadores A - Avanço de geração $F_{4,5}$ (Autofecundação) - Testcrosses - 2 testadores-elites $(A) \times R F_4$ - Colheita de $\cong 800$ híbridos $A \times R$ 	<p>420 progênies F_4 2 testadores $\times 400 R \cong$ 800 híbridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parear A e R - 1 fileira de 4 m de cada - Autofecundar 2 plantas de R - Cada R polinizar 3-4 plantas da fêmea - Descartar linhagens ruins de pólen
				
3	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação de híbridos: 800 Testcrosses - Locais : 2 - Avaliação de progênies $F_{4,5}$ - Colheita de sementes $F_{4,6}$ 	<p>400 progênies F_5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parcela de 2 linhas de 3 m - 3 repetições - Inserir pelo menos 2 testemunhas comerciais - 1 fileira de 2 m/progênie - Autofecundação - Avançar 12,5% das linhagens com base nos resultados dos testcrosses
				
4	1	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de geração $F_{6,s}$ (Autofecundação) - Colheita de sementes $F_{4,7}$ - Topcrosses $A \times R$ 	<p>50 progênies F_6 10 testadores $\times 50$ linhagens $\cong 500$ híbridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 2 fileiras de 4 m - Colher em bulk - Cruzar linhagens selecionadas com 8-10 fêmeas A. - Produzir sementes para ensaios em pelo menos quatro locais (300 g de sementes)
				

Continua...

Tabela 3. Continuação

Ano	Safra	Operações	Número	Observações
4	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de geração $F_{4,s}$ (Autofecundação) - Colheita de sementes F_n - Avaliação de progênes $F_{4,7}$ - Colheita de sementes F_n - Testcrosses - 4 fileiras/parcela - 3 repetições - 5 metros/fileira - 5 locais - 5 testemunhas comerciais 	<p>50 progênes F_n</p> <p>500 híbridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundar 20 plantas por fileira; - Selecionar 1 planta para avanço de geração; - Avançar 10% das linhagens com base nos resultados dos testcrosses
				
5	1	<ul style="list-style-type: none"> - Síntese de novas populações com as linhagens elites do programa para novo ciclo de seleção 	5 linhagens R	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplicar linhagens selecionadas a partir da semente genética obtida na geração anterior

Metodologia de Seleção para Pequena População Inicial e Seleção Branda entre Populações

No exemplo a seguir, considera-se a realização de 10 cruzamentos $B \times B$ e $R \times R$ (dialelo parcial do cruzamento de cinco genótipos entre si). (Tabela 4, 5 e 6). Nas gerações iniciais, é realizada intensa seleção dentro das populações, e baixa seleção entre populações, utilizando-se somente um local de seleção.

Neste modelo será realizada anualmente síntese de novas populações B e R. As populações são avançadas em polinização aberta F_4 , selecionando plantas dentro da fileira, usando método de pedigree. Após esta geração são autofecundadas plantas selecionadas.

Tabela 4. Sugestões de estratégias a serem usadas no melhoramento de sorgo, considerando nove cruzamentos/ano.

Gerações	Número de plantas	Tamanho da parcela
F_1	3/cruzamento	3 vasos/cruzamento
$F_{2:3}$	400/população	8 fileiras de 5 m
$F_{3:4}$	200/população	4 fileiras de 5 m
$F_{4:5}$	50/população	1 fileira de 5 m
$F_{5:6}$	50/população	1 fileira de 5 m
$F_{6:7}$	50/população	1 fileira de 5 m
$F_{7:n}$	50/população	1 fileira de 5 m

Adaptado de Ramalho et al. (2012).

Tabela 5. Modelo esquemático do processo de desenvolvimento de linhas A/B

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
1	1	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de F_1s - Cruzamentos manuais de $B \times B$ - 30 vasos 	10 cruzamentos entre linhas B	<ul style="list-style-type: none"> - Casa de vegetação - 2 a 3 plantas/cruzamento
				
1	2	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundação dos F_1s - 10 fileiras - ou 50 vasos 	10 populações $B \times B$	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de 5 metros/população ou 5 vasos/população em casa de vegetação (2 plantas/vaso) - Proteger plantas no florescimento
				
2	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_2s - 80 fileiras F_2 - Colheita de 800 progênies $F_{2:3}$ 	10 populações em F_2	<ul style="list-style-type: none"> - Conduzir em polinização aberta - 8 fileiras de 5 m, \cong 400 plantas/população - Selecionar 20% dentro de cada populações (80 plantas/população)
				

Continua...

Tabela 5. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
2	2	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_3s - 3200 fileiras F_3 - Colheita de semente $F_{3:4}$ 	800 progênies em F_3 (80 / população)	<ul style="list-style-type: none"> - Conduzir em polinização aberta - 4 fileiras de 5 m/ progênie (200 plantas) - Seleção de 20% entre progênies da mesma população (16/população) - Colher 3 plantas por progênie selecionada
3	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_4s - Colheita de 300 progênies $F_{4:5}$ 	480 progênies F_4 (48 / população)	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundar 5 plantas por progênie - 1 fileira de 5 m/ progênie - Seleção de 20% entre progênies da mesma população \cong 10 progênies - Colher 3 plantas por progênie selecionada
3	2	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamentos linhagem A \times B F_5s - Avanço B (Autofecundação) - Colheita do F_1 A / B - Colheita das linhagens $F_{2:6}$ B - 300 fileiras A - 300 fileiras B $F_{5:6}$ 	300 linhagens BF_5	<ul style="list-style-type: none"> - Plantio de fileiras emparelhadas, linhagem com citoplasma A_1 e $B F_5$. - Cruzar 3 plantas da linhagem $B F_5$ com plantas A_1 e identificar os pares - Colher os 3 pares e selecionar o de melhor "produtibilidade"

Continua...

Tabela 5. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
4	1	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamento do F_1 ($A \times B$) \times $B F_6$ - Avanço B (Autofecundação) - Colheita do $RC_{1:2}$ - Colheita das linhagens $F_{6:7}$ B 	300 pares ($A \times B F_{5s}$)	<ul style="list-style-type: none"> Plantio de fileiras emparelhadas, F_1 ($A \times B F_{5s}$) e $B F_6$ - Cruzar 3 plantas da linhagem $B F_6$ com plantas $A \times B F_{5s}$ e identificar os pares - Selecionar 70% das linhagens dentro de cada população - Colher os 3 pares das linhagens selecionadas e escolher o de melhor “produtibilidade”
				
4	2	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamento do RC_1 ($F_1 \times B F_6$) \times $B F_7$ - Avanço B (Autofecundação) - Colheita do $RC_{2:2}$ - Colheita das linhagens $BF_{7:8}$ 	210 pares de $RC_1 \times B F_6$	<ul style="list-style-type: none"> Plantio de fileiras emparelhadas, RC_1 ($F_1 \times B F_{6s}$) e $B F_7$ - Cruzar 03 plantas da linhagem $B F_6$ com plantas $A \times B F_{6s}$ e identificar os pares - Selecionar 70% das linhagens dentro de cada população - Colher os 3 pares das linhagens selecionadas e escolher o de melhor “produtibilidade”
				

Continua...

Tabela 5. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
5	1	<ul style="list-style-type: none"> -Cruzamento do RC_2 ($RC_1 \times BF_7$) \times $B F_8$ - Avanço de geração $B F_n$ (Autofecundação) - Colheita do $RC_{3:2}$ - Colheita das linhagens $B F_n$ 	$\cong 150$ pares de $RC_2 \times BF_7$	Plantio de fileiras emparelhadas, RC_2 ($RC_1 \times B F_7$'s) e $B F_8$ - Cruzar 3 plantas da linhagem $B F_7$ com plantas $A \times B F_7$ s e identificar os pares - Selecionar 70% das linhagens dentro de cada população - Colher os 3 pares das linhagens selecionadas e escolher o de melhor "produtibilidade"
				
5	2	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamento do RC_3 ($RC_2 \times BF_8$) \times $B F_n$ - Autofecundação da geração $B F_n$ - Colheita do $RC_{4:2}$ - Colheita das linhagens $B F_n$ - 2 testadores-elites (R) - Colheita de 300 híbridos $A \times RC_3 \times R$ 	150 pares $RC_3 \times BF_8$ 150×2 (Testadores) = 300 híbridos	Plantio de fileiras emparelhadas, RC_3 ($RC_2 \times B F_8$'s) e $B F_n$ - Cruzar 3 plantas da linhagem $B F_n$ com plantas $A \times B F_8$ s e identificar os pares - Colher os 3 pares das linhagens selecionadas e escolher o de melhor "produtibilidade" - Cruzar 3 a 5 plantas das linhagens $A RC_3$ com 2 testadores R
				

Continua...

Tabela 5. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
6	1	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzamento do RC_4 ($RC_3 \times BF_n$) \times $B F_n$ - Autofecundação da geração $B F_n$ - Colheita do RC_5 (linhagem finalizada "A") - Colheita das linhagens B - Testercrosses - 2 a 4 fileiras/parcela - 2 repetições - 5 metros/fileira - 1 local - 2 a 3 testemunhas comerciais 	<p>150 pares $RC_4 \times BF_n$ 300 híbridos</p>	<p>Plantio de fileiras emparelhadas, RC_4 ($RC_3 \times B F_n$) e $B F_n$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cruzar 06 plantas da linhagem $B F_n$ com plantas $A \times B F_n$ e identificar os pares - Colher todos os pares de linhagens A e B - Selecionar a melhor planta para avanço da semente genética - Fazer bulk das demais para síntese de híbridos preliminares - Avançar 20% das linhagens com base nos resultados dos testercrosses
				
6	2	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplicação da linhagem A - Autofecundação da linhagem B - Colheita da linhagem estéril (A) - Colheita da linhagem fértil (B) - Testercrosses $A \times R$ 	<p>30 linhagens A 30×5 (Testador) = 150 híbridos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplicar o par selecionado na geração anterior (semente genética), produzir 2 kg de A e B. - Colher todas as plantas cruzadas e autofecundadas - Cruzar 8 a 10 plantas das linhagens A com 5 testadores R
				

Continua...

Tabela 5. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
7	1	<ul style="list-style-type: none"> - Testercrosses - 4 fileiras/parcela - 3 repetições - 5 metros/fileira - 5 locais - 5 testemunhas comerciais 	150 híbridos	- Avançar 10% das linhagens com base nos resultados dos testercrosses
				
7	2	<ul style="list-style-type: none"> - Síntese de novas populações com as linhagens elites do programa para novo ciclo de seleção 	5 pares de linhagens	- Multiplicar linhagens selecionadas a partir da semente genética obtida na geração anterior

Tabela 6. Modelo esquemático do processo de desenvolvimento de linhas R

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
1	1	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de F_1s - Cruzamentos manuais de $R \times R$ - 30 vasos 	10 cruzamentos entre linhas R	<ul style="list-style-type: none"> - Casa de vegetação - 2 a 3 plantas/cruzamento
				
1	2	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundação dos F_1s - 10 fileiras - ou 50 vasos 	10 populações $R \times R$	<ul style="list-style-type: none"> - 1 fileira de 5 metros/população ou 5 vasos/população em casa de vegetação (2 plantas/vaso) - Proteger plantas no florescimento
				

Continua...

Tabela 6. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
2	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_2s - 80 fileiras F_2 - Colheita de 800 progênies F_3 	10 populações em F_2	<ul style="list-style-type: none"> - Conduzir em polinização aberta - 8 fileiras de 5 m, \cong 400 plantas / população - Selecionar 20% dentro de cada populações (80 plantas/população)
				
2	2	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_3s - 3.200 fileiras F_3 - Colheita de semente F_4 	800 progênies em F_3 (80 / população)	<ul style="list-style-type: none"> - Conduzir em polinização aberta - 4 fileiras de 5 m/ progênie (200 plantas) - Seleção de 20% entre progênies da mesma população (16/ população) - Colher 3 plantas por progênie selecionada
				
3	1	<ul style="list-style-type: none"> - Seleção de F_4s - Colheita 300 progênies $F_{4:5}$ 	480 progênies F_4 (48 / população)	<ul style="list-style-type: none"> - Conduzir em polinização aberta - 1 fileira de 5 m/ progênie - Seleção de 20% entre progênies da mesma população \cong 10 progênies - Colher 3 plantas por progênie selecionada
				

Continua...

Tabela 6. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
3	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de geração $F_{4,5}$ - Colheita 290 progênes F_6 - 2 testadores-elites (A) - Colheita de 580 híbridos 	290 progênes F_5 (29 / população) 290×2 (Testadores) = 580 híbridos	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundar 5 plantas por fileira - 1 fileira de 5 m/ progênie - Selecionar 1 planta para avanço de geração - Cruzar 3 a 5 plantas das linhagens RF_4 com 2 testadores A
				
4	1	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de geração $F_{4,6}$ - Colheita 290 progênes F_7 - Testcrosses - 2 a 4 fileiras/parcela - 2 repetições - 5 metros/fileira - 1 local - 2 a 3 testemunhas comerciais 	290 progênes F_6 (29 / população) 580 híbridos	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundar 5 plantas por fileira - 1 fileira de 5 m/ progênie - Selecionar 1 planta para avanço de geração - Avançar 20% das linhagens com base nos resultados dos testcrosses
				
4	2	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de geração F_7 - Colheita 52 progênes F_n - Testcrosses $A \times R$ 	58 linhagens F_7 58×5 (Testador) = 290 híbridos	<ul style="list-style-type: none"> - Autofecundar 20 plantas por fileira - 1 fileira de 5 m/ progênie - Selecionar 1 planta para avanço de geração - Cruzar 8 a 10 plantas das linhagens A com 5 testadores R
				

Continua...

Tabela 6. Continuação

Ano	Safra	Operação	Número	Observações
5	1	<ul style="list-style-type: none"> - Testcrosses - 4 fileiras/parcela - 3 repetições - 5 metros/fileira - 5 locais - 5 testemunhas comerciais 	290 híbridos	- Avançar 10% das linhagens com base nos resultados dos testcrosses
				
5	2	<ul style="list-style-type: none"> - Síntese de novas populações com as linhagens elites do programa para novo ciclo de seleção 	5 linhagens R	- Multiplicar linhagens selecionadas a partir da semente genética obtida na geração anterior

Organização das Parcelas de Melhoramento no Campo

A organização do campo de melhoramento é importante para permitir um trabalho sistematizado de avaliação e vistoria. Os esquemas teóricos (Tabela 7) servem como indicação dos índices de seleção e sequência de trabalho. Nada substitui o olhar do melhorista no campo de linhagens segregantes.

Em uma carta de 1941, Henry Wallace, fundador da Pioneer e posteriormente vice-presidente dos Estados Unidos, escreveu para Raymond Baker: “Como você sabe, eu sempre fui mais interessado no material genético superior do que nas metodologias em si. Não há nenhum substituto para a observação do homem que vive próximo do seu material e que possa perceber um lance de sorte quando o vê.”

Abaixo, um esquema sugestivo de organização das gerações no campo.

Tabela 7. Esquema sugestivo de organização das gerações no campo.

Blocos	Frente do campo	
	Safrinha	Verão
1	Linhagens F _n	Linhagens F _n
2	Progênes F ₆	Progênes F ₇
3	Progênes F ₄	Progênes F ₅
4	Progênes F ₂	Progênes F ₃
5	Bloco de emasculação	F _{1s}
6	Campo de esterilização	Campo de esterilização
7	Campo de síntese de híbridos	Campo de síntese de híbridos

A geração de linhagens é parte essencial do programa de melhoramento. Novas linhagens serão utilizadas em cruzamentos dialélicos com as demais linhagens-elites do programa, buscando a geração de híbridos superiores, bem como serão incorporadas ao banco genético e utilizadas na síntese de novas populações, gerando novos ciclos de seleção.

Desenvolvimento e Avanço de Híbridos de Sorgo

Tão importante quanto a geração de linhagens é o programa de testes e avanço de híbridos, com o propósito de avaliação, seleção, atendimento aos requisitos legais de registro, lançamento e comercialização.

Abaixo, pode ser observado (Tabela 8) um modelo esquemático sugestivo do processo de ensaios de avaliação de híbridos. Normalmente as primeiras etapas, iniciando nos ensaios de topcrosses e preliminares, são conduzidas dentro das unidades de pesquisa ou áreas polo, sob a coordenação da equipe de pesquisa. Os ensaios Preliminares II ou reteste de híbridos superiores e ensaios com o propósito de geração de dados para suportar o registro oficial dos híbridos (VCU) são realizados pelas equipes de desenvolvimento de produtos. Nas etapas avançadas e pré-comerciais deve-se envolver as equipes comerciais e marketing, para a partir desta etapa iniciar um programa de geração de demanda, com o propósito do lançamento comercial do novo híbrido.

Tabela 8. Modelo esquemático do processo de desenvolvimento híbridos de sorgo

Ano	Safra	Operações	Quantidade	Observações
1	1	- Produção de híbridos preliminares - R × 2 Testadores A) (polinização manual) - (A × 2 Testadores R) (polinização manual)	Número de híbridos função dos modelos anteriores	- Parcela: 2 linhas de 3 m - 2 repetições - 2 Locais
				
1	2	- Produção de híbridos preliminares - R × 2 Testadores A) (polinização manual) - (A × 2 Testadores R) (polinização manual)	Número de híbridos função dos modelos anteriores	- Parcela: 2 linhas de 3 m - 2 repetições - 2 Locais
				
2	1	- Avaliação preliminar de híbridos I	400	- Parcela: 2 linhas de 3 m - 3 repetições - 5 Locais
				
2	2	- Avaliação de preliminar de híbridos II	100	- Parcela: 2 linhas de 5 m - 3 repetições - 10 Locais
				
3	1	- Avaliação de híbridos avançados I - (Ensaio de VCU 1)	25	- Parcela: 4 linhas de 5 m - 3 repetições - 25 Locais
				

Continua...

Tabela.8 Continuação

Ano	Safra	Operações	Quantidade	Observações
3	2	- Avaliação de híbridos avançados IV - (Ensaio de VCU 2)	25	- Parcela: 4 linhas de 5 m - 3 repetições - 10 Locais
				
4	1	- Avaliação de híbridos avançados - (Ensaio de VCU 3); Ensaio em rede	5	- Parcela: 4 linhas de 5 m - 3 repetições - 25 Locais
				
4	2	- Avaliação de híbridos avançados - (Ensaio de VCU 4); Ensaio em rede	5	- Parcela: 4 linhas de 5 m - 3 repetições - 25 Locais
				
5	1	- Validação de híbridos pré-comerciais - Unidades de observação (UOs)	2	- Parcela: 8 linhas de 10 m - 40 Locais
				
5	2	- Validação de híbridos pré-comerciais - Unidades de observação (UOs)	2	- Parcela: 8 linhas de 10 m - 40 Locais

Na Figura 1 são descritos os estágios de desenvolvimento de híbridos de sorgo, considerando desde os primeiros cruzamentos-testes (Testcrosses) até o descarte do híbrido. Como escrito acima, o objetivo é apresentar uma proposta que possa servir de modelo para que cada programa siga, aumente ou reduza seus cruzamentos de acordo com sua estrutura física e de pessoal.

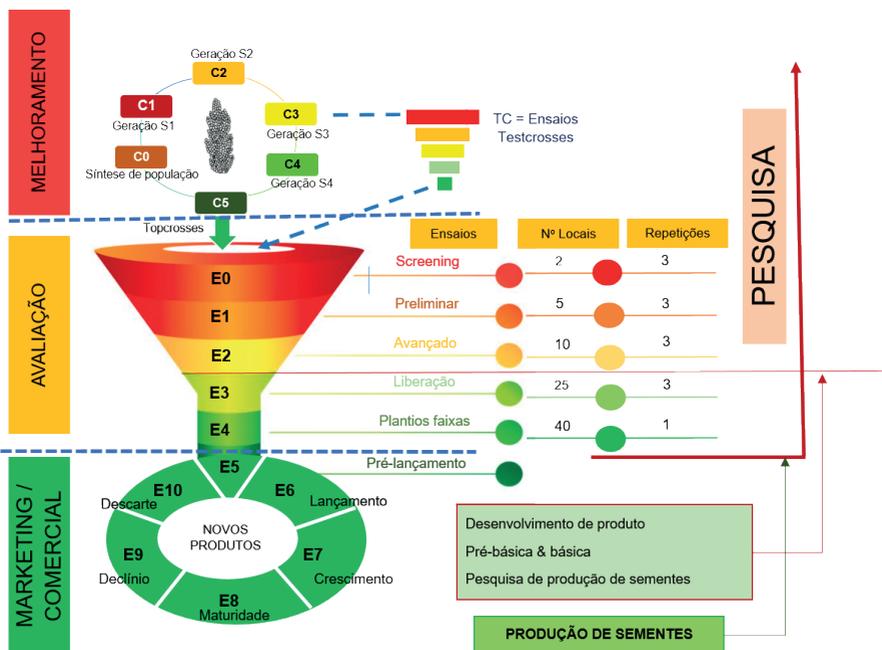


Figura 1. Estágios de desenvolvimento de híbridos de sorgo. Fonte: Helix Sementes e Mudas Ltda.

Estágios de Desenvolvimento e Ciclo de vida de Híbridos de Sorgo

Abaixo é apresentada ainda uma planilha com sugestão dos estágios de desenvolvimento e ciclo de vida de híbridos de sorgo no mercado. Os estágios de testes e ensaios são hipotéticos, e as nomenclaturas podem variar entre as diferentes empresas, bem como o número de locais de testes e volumes.

Descrição dos Estágios de Desenvolvimento de Híbridos de Sorgo

Estágio TC: “TESTCROSSES”

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E-TC	Ensaio de “Testcrosses”	Pesquisa	2	2	3

Estágio E0: Screening

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E0 Screening	Ensaio de “Screening”	Pesquisa	2	2	3
	Produção de semente dos híbridos – 1,0 kg	Pesquisa			

Estágio E1: Preliminar

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E1 Preliminar	Ensaio preliminar de híbridos	Pesquisa	5	2	3
	Produção de semente dos híbridos – 2,0 kg	Pesquisa			

Estágio E2: Avançado*

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E2 Avançado	Ensaio avançado de híbridos, ensaios em rede	Pesquisa e Transferência	10	4	3
	Produção de semente dos híbridos – 8,0 kg	Pesquisa			
	Produção de sementes dos parentais - Macho: 5,0 kg - Fêmea: 10,0 kg	Pré-Básica			

* Produção de 40 panículas oriundas de uma panícula de cada linhagem nova. Realizar ensaios de pesquisa de produção de sementes (produtibilidade das linhagens, grow out) e split de florescimento em área comercial.

Estágio E3: Liberação*

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E3 Liberação	Ensaio Liberação (Híbridos novos, Híbridos comerciais e Híbridos de outras empresas)	Pesquisa e Transferência	25	4	3
	Produção de sementes dos híbridos selecionados – 1.000,0 kg	Pré-Básica			
	Produção de sementes dos Parentais - Macho – 20,0 kg - Fêmea – 40,0 kg	Pré-Básica			

* Iniciar multiplicação da semente genética. Continuar ensaios de produtividade para os híbridos novos

Estágio E4: Faixas (Strip test)*

Estágio	Atividades	Responsável	Ensaio (Número)		
			Locais	Fileira	Repetição
E4 Faixas	Plantio em Faixas, unidades de observação (UOs)	Transferência	40	4	3
	Produção de sementes dos parentais: - Macho – 1.000 kg - Fêmea – 3.000 kg	Básica			

* Ensaios em áreas de cooperados, revendas, cooperativas. Se os plantios em faixas forem feitos no verão do ano, será possível multiplicar as sementes dos híbridos em pré-lançamento no inverno do próximo ano, podendo-se adiantar um ano no lançamento do híbrido.

Estágio E5: Pré-lançamento

Estágio	Atividades	Responsabilidade
E5 Pré-Lançamento	Produção de Semente Comercial – 5.000 sacos de 10 kg	Produção

Estágio E6: Lançamento

Estágio	Atividades	Responsabilidade
Estágio E6 Lançamento	Reteste em Ensaios de Performance	Pesquisa
	Reteste em Ensaios em Faixas	Transferência
	Reteste em Ensaios Oficiais	Pesquisa/ Transferência
	Reteste em Ensaios de Cooperativas	Transferência
	Produção de sementes	Produção
	Elaboração de Material Promocional	Marketing
	Distribuição acompanhada	Marketing

Estágio E7: Crescimento

Estágio	Atividades	Responsabilidade
Estágio E7 Crescimento	Reteste em Ensaios de Performance	Pesquisa
	Reteste em Ensaios em Faixas	Transferência
	Reteste em Ensaios Oficiais	Pesquisa/ Transferência
	Reteste em Ensaios de Cooperativas	Transferência
	Produção de sementes	Produção
	Distribuição acompanhada	Marketing

Estágio E8: Maturidade

Estágio	Atividades	Responsabilidade
Estágio E8 Maturidade	Reteste em Ensaios de Liberação	Pesquisa
	Reteste em Ensaios em Faixas	Transferência
	Reteste em Ensaios Oficiais	Pesquisa/ Transferência
	Reteste em Ensaios de Cooperativas	Transferência
	Produção de sementes	Produção

Estágio E9: Declínio

Estágio	Atividades	Responsabilidade
Estágio E9 Declínio	Compatibilizar os estoques de semente básica com o plano de vendas tentando evitar sobras de sementes básicas	Semente básica
	Não incluir o produto em nenhuma atividade ou evento promocional	Marketing

Estágio E10: Descarte

Estágio	Atividades	Responsabilidade
Estágio E10 Descarte	Retirada do mercado	Marketing

Fonte: Helix Sementes e Mudas Ltda.

Não menos importante que a criação de linhagens, realização de ensaios e posicionamento de produtos, tem-se a produção de sementes de boa qualidade, quantidade e custos, do híbrido lançado, para que este possa apresentar os resultados que sustentaram seu lançamento.

Portanto, a fase seguinte é a realização de ensaios de pesquisa de produção, com o propósito de definir a melhor recomendação para produção de sementes do híbrido. Nesta etapa, é essencial definir a melhor época de produção, local de plantio, espaçamento e população dos parentais, recomendação de fertilidade, fungicida e inseticida.

Um dos parâmetros mais críticos na produção de sementes é a definição do intervalo de plantio entre os parentais (split) para garantir a coincidência no florescimento masculino e feminino. Abaixo apresentamos os procedimentos para esta avaliação.

Procedimento para Avaliação do Florescimento de Progenitores de Sorgo

1. Realizar ensaio de coincidência de florescimento (split) na mesma época e no mesmo local da produção comercial de sementes;
2. Plantar, a cada dois ou três dias, uma fileira de 20 m ou duas de 10 m (\cong 200 plantas) de cada progenitor, observando o espaçamento entrelinhas usualmente utilizado nos campos de produção de sementes;
3. Anotar a data do plantio e a data da emergência de cada progenitor;
4. Iniciar a avaliação quando a primeira planta do progenitor masculino estiver liberando pólen e/ou a primeira planta do progenitor feminino estiver receptiva;
5. Fazer as avaliações diariamente no período que compreende o início até o final da floração, para ambos os progenitores;
6. Em cada avaliação, anotar o número de plantas do progenitor masculino liberando pólen e o número de plantas receptivas do progenitor feminino;
7. Preencher a ficha de avaliação (Tabela 9).
8. Determinar, em dias após o plantio (DAP), o período de florescimento (início e fim) de cada progenitor em cada época de plantio, preenchendo o Tabela 10;
9. Identificar, no período de florescimento, o DAP em que se registrou maior número de plantas do progenitor masculino liberando pólen e maior número de plantas do progenitor feminino receptivas. Inserir essa informação no Tabela 10;
10. Calcular, considerando as informações da Tabela 10, a diferença em dias na floração entre os progenitores. Para isso considerar o DAP em que se registrou maior número de plantas do progenitor masculino liberando pólen e maior número de plantas do progenitor feminino receptivas. Inserir essa informação no Tabela 10;
11. Definir, com base na diferença de floração entre os progenitores em cada época de plantio avaliada, o melhor split para o sincronismo de florescimento dos mesmos.

A pesquisa de produção deve criar uma ficha de produção de cada parental, que permita identificá-los nos campos de produção para facilitar a fase de *rouging*. De posse da ficha, os técnicos serão capazes de reconhecê-los e identificar prováveis misturas ou plantas atípicas. Esta ficha deve conter o máximo de informações fenológicas e de comportamento, para auxiliar em todas as operações de campo.

A ficha de recomendação técnica de produção, apresentada abaixo, sintetiza todas estas informações e permitirá produzir com segurança o híbrido desenvolvido pela empresa e com isso garantir a performance do produto, o crescimento da empresa e sua sustentabilidade.

Tabela 9. Anotação de florescimento dos parentais do híbrido

Nome do híbrido: _____ Data do plantio: _____

LM-Linhagem mãe: _____ LP-Linhagem pai: _____

Data da avaliação	Dias após o plantio - DAP	LM	LP
		Número de plantas receptivas	Número de plantas liberando pólen

Floração do progenitor masculino: momento em que houver o início da liberação de pólen pelas flores localizadas no terço central da panícula.

Floração do progenitor feminino: momento em que houver o início de receptividade das flores localizadas na parte central da panícula.

Ficha Técnica de Linhagem Restauradora de Sorgo

Identificação da linhagem:



Crescimento Vegetativo



Panícula no florescimento



Flor restauradora

Características morfológicas	
Antocianina no coleótilo:	
Altura da planta (cm):	
Cor da lesão folha:	
Coloração da folha:	
Qualidade do colmo:	
Cor nervura central:	
Enraizamento:	

Panícula no florescimento	
Formato da panícula:	
Densidade da panícula:	
Coloração do estigma:	
Coloração da gluma:	
Volume de pólen:	
Blasting:	
Presença de arista:	

Panícula na maturidade	
Coloração do grão:	
Qualidade do grão:	
Cor da gluma:	
Cor da lesão:	
Ciclo (Graus-Dias):	
Peso 1.000 sementes (g):	
Peso hectolitro (kg):	



Panícula na maturidade



Cor da gluma

Ficha Técnica de Linhagem Macho-Estéril de Sorgo

Identificação da linhagem:



Crescimento Vegetativo



Panícula estéril (A)



Flor estéril -
Amarelo-clara

Características morfológicas	
Antocianina no coleótilo:	
Altura da planta (cm):	
Cor da lesão folha:	
Coloração da folha:	
Qualidade do colmo:	
Cor nervura central:	
Enraizamento:	

Panícula no florescimento	
Formato da panícula:	
Densidade da panícula:	
Coloração do estigma:	
Coloração da gluma:	
Volume de pólen:	
Blasting:	
Presença de arista:	

Panícula na maturidade	
Coloração do grão:	
Qualidade do grão:	
Cor da gluma:	
Cor da lesão:	
Ciclo (Graus-Dias):	
Peso 1.000 sementes (g):	
Peso hectolitro (kg):	



Panícula fértil (B) -
Amarela



Cor da lesão

Fotos: Cícero Beserra Menezes

Exemplo de Recomendação Técnica de Produção de Sementes

Identificação dos parentais

Híbrido: BRS

Parentais	
Linhagem Fêmea A	Linhagem Macho R

Período recomendando para plantio

Altitude	Meses											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
< 600 m	Amarelo	Verde	Verde	Amarelo	Vermelho							
> 600 m	Vermelho											
Risco	baixo		médio		alto							

Proporção fêmea:macho e espaçamento

Proporção	Espaçamento (cm)		
	Fêmea:Fêmea	Fêmea:Macho	Macho:Macho
12:4	45 / 60	45 / 60	45 / 60

População de plantas por hectare

População (x 1.000 plantas/ha)	
Fêmea	Macho
180 - 200	180 - 200

Rouging

Atípicas	Restauradora	Rouging			Nº de dias do plantio ao pólen	
		Atenção	Início	Grau de dificuldade	Fêmea	Macho
Retirar antes do florescimento	Retirar durante florescimento	Alta	Florescimento	Média	59 - 64	60 - 65

Split de plantio fêmea: macho

Época	Plantio		
	Fêmea	1º macho	2º macho
15/02	P*	P	7 DAP**
01/03	P	P	7 DAP
15/03	P	P	10 DAP
01/04	P	P	10 DAP

* P : plantio; DAP** : Dias após plantio

Colheita:

- Dessecar quando o grão de sorgo estiver com umidade entre 18% e 20%.
- Colher com 15% de umidade.

Referências

- HEERWAARDEN, J. van; HUFFORD, M. B.; ROSS-IBARRA, J. Historical genomics of North American maize. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 31, p. 12420-12425, 2012.
- HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. 2nd ed. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1985.
- MENDES, S. M.; VIANA, P. A.; OLIVEIRA, I. R. de; MENEZES, C. B. de; WAQUIL, J. M.; TOMPSON, W. Problema no sorgo: pulgão-da-cana-de-açúcar. **A Granja**, ano 76, n. 854, p. 52-53, fev. 2020.
- MENEZES, C. B. de; SILVA, A. F. da; TARDIN, F. D. Sorgo safrinha. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 293-308. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).
- RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2012. 522 p.

RODRIGUES, J. A. S.; MENEZES, C. B. de; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; TABOSA, J. N. Utilização do sorgo na nutrição animal. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 229-246. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

SILVA, K. J.; PASTINA, M. M.; GUIMARÃES, C. T.; MAGALHÃES, J. V.; PIMENTEL, L. D.; SCHAFFERT, R. E.; PINTO, M. O.; SOUZA, V. F.; BERNARDINO, K. C.; SILVA, M. J.; BORÉM, A.; MENEZES, C. B. Genetic diversity and heterotic grouping of sorghum lines using SNP markers. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 6, e20200039, 2021.

STEPHENS, J. C.; HOLLAND, P. F. Cytoplasmic male sterility for hybrid sorghum seed production. **Agronomy Journal**, v. 46, p. 20-23, 1954.

VENKATESWARAN, K.; ELANGO VAN, M.; SIVARAJ, N. Origin, domestication and diffusion of *Sorghum bicolor*. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; VENKATESH BHAT, B.; TONAPI, V. A. **Breeding sorghum for diverse end uses**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. p. 15-31.

Capítulo 7

Síntese e melhoramento de populações em sorgo

Cícero Beserra de Menezes
Flávio Dessaune Tardin
Rafael Augusto da Costa Parrella
Robert Eugene Schaffert

Introdução

O sorgo ocupa lugar de destaque entre as principais culturas agrícolas do País, pela sua excepcional capacidade produtiva em ampla gama de ambientes, pela sua versatilidade (grão, silagem, etanol, biomassa), pelo seu baixo custo de plantio, e pelo seu sistema radicular profundo, que auxilia na tolerância à seca e reciclagem de nutrientes, possuindo ainda maior janela de plantio quando comparado a outros cereais (Menezes et al., 2015; Martins et al., 2016; Gomes et al., 2019).

Experimentos mostram que a produtividade de sorgo granífero pode ultrapassar 10,0 t/ha e 7,0 t/ha, respectivamente, em condições favoráveis no verão e em plantios de sucessão (Santos et al., 2005; Menezes et al., 2015; Teodoro et al., 2016). Já o sorgo forrageiro pode alcançar produtividade, no primeiro corte, de 15 t a 20 t por hectare de matéria seca, ou seja, de 45 t a 60 t de forragem verde por hectare. O sorgo forrageiro possui capacidade de rebrota, o que possibilita uma produção de 40% do primeiro corte (Rodrigues et al., 2015).

Embora o sorgo não seja nativo do Brasil, seu centro de origem é nos trópicos, em condições muito similares às brasileiras. Já existem muitos híbridos de sorgo com boa produtividade no mercado nacional. Mas, por outro lado, ainda encontramos híbridos desenvolvidos para zonas temperadas, como aqueles oriundos da Argentina e dos Estados Unidos. Se, apesar disso, as produções têm sido boas, é lógico afirmar-se que podem ser muito melhores com a utilização de materiais genéticos adaptados e desenvolvidos para as condições brasileiras.

A Coleção Mundial de Sorgo tem aproximadamente 30.000 acessos, e ainda existem alguns milhares de outras linhagens em programas de melhoramento ao redor do mundo. O sorgo é uma espécie autógama, com pequena taxa de intercruzamentos. Com estes fatos em mente, é fácil observar que é praticamente impossível serem avaliadas estas inúmeras fontes de germoplasma de sorgo e utilizá-las em um programa de melhoramento de plantas convencional, fazendo cruzamentos manuais, estudando e avaliando as progêneses segregantes.

Em países como Estados Unidos, Argentina, México e Austrália, utiliza-se a heterose ou vigor híbrido que geralmente ocorre em híbridos de sorgo. Entretanto, em muitos países da África e Ásia, ainda são utilizadas variedades por causa das dificuldades na produção e comercialização de sementes híbridas. Os melhoristas desses países utilizam o vigor que é possível fixar em linhagens homozigotas.

Considerando esses fatos, é óbvio que necessitamos de um sistema de melhoramento de plantas que possa utilizar o grande número de acessos existentes na coleção mundial e em programas de melhoramento, adaptadas às várias condições ambientais do Brasil, e que possibilite a utilização de materiais melhorados em combinações híbridas ou diretamente como variedades, neste caso, linhagens puras.

Para resolver estes problemas, Dogget (1968), Dogget e Eberhart (1968), Gardner (1972), Bhola (1982), Mohamed (1983) e Reddy e Kumar (2005) desenvolveram sistemas de utilização de populações de intercruzamento em sorgo. No entanto, estes sistemas não têm sido utilizados no melhoramento de sorgo em razão do maior tempo necessário para a obtenção de resultados comerciais, mas são muito parecidos com os que têm sido utilizados com sucesso no melhoramento de milho há muitos anos.

Estes sistemas envolvem a utilização de um gene simples, que controla a macho-esterilidade genética, para desenvolvimento de um mecanismo que permite ao sorgo possibilidade de intercruzamentos ao acaso. Em razão de o milho ser uma espécie alógama, com flores masculinas e femininas separadas numa mesma planta, e o sorgo ser uma espécie autógama com flores completas, as técnicas e os métodos de seleção devem sofrer pequenas modificações.

Antes de ser iniciada a discussão sobre desenvolvimento e melhoramento de populações, há necessidade de explicarmos que ocorrem dois sistemas básicos de esterilidade masculina em sorgo: um sistema genético

simples e um sistema genético citoplasmático. O sistema genético envolve um gene simples recessivo que produz panículas macho-estéreis quando em homozigose e panículas macho-férteis em condições heterozigotas ou homozigotas para o alelo dominante.

O gene que condiciona macho-esterilidade preferido na síntese de populações é o ms_3 , por ser o mais estável e de fácil identificação no campo. O gene ms_7 tem sido utilizado na África com algum sucesso (Reddy; Reddy, 2019). Estes macho-estéreis devem ser identificados e etiquetados na fase de antese. O gene *autherless* (*al*) que também condiciona macho-esterilidade tem sido utilizado na síntese de algumas populações, porque é facilmente identificável no momento da colheita, o que não ocorre com os genes *ms*. Este gene *al* não é muito utilizado, pois sua herança é mais complexa, provocando uma frequência de plantas macho-estéreis bem menor que a esperada.

Estes genes de macho-esterilidade genética não são utilizados na produção comercial de híbridos de sorgo, mas são úteis no desenvolvimento de pesquisas.

O sistema de macho-esterilidade genético-citoplasmática é o único utilizável na produção de híbridos comerciais. A macho-esterilidade envolve a interação entre o citoplasma e genes restauradores da fertilidade masculina (*rf*). Nos programas de melhoramento e produção de híbridos de sorgo é utilizada a seguinte terminologia:

- Linhagem A – Macho-estéril: linhagem com citoplasma estéril e genes recessivos *rfrf* (não restauradora da fertilidade masculina);
- Linhagem B – Mantenedora: linhagem com citoplasma normal e genes recessivos *rfrf* (não restauradora da fertilidade masculina);
- Linhagem R – Restauradora da fertilidade: linhagem com citoplasma normal e genes dominantes *RfRf* (restauradora da fertilidade masculina).

Mais informações sobre uso de macho-esterilidade em sorgo poderão ser vistas no Capítulo 4 deste livro.

Síntese de Populações

O sistema de macho-esterilidade utilizado na síntese de populações de sorgo é o sistema genético ms_3 , relatado na variedade *Coes*. As linhagens que entrarão na síntese das populações são inicialmente identificadas como linhagem B ou R, dependendo se elas restauram ou não a fertilidade quando

cruzadas com uma linhagem A. As populações de sorgo são desenvolvidas usando somente linhagens B, somente linhagens R ou uma mistura de linhagens B e R. As populações resultantes são chamadas populações B, populações R ou populações BR.

A razão de se sintetizar populações somente com linhagens B ou somente com linhagens R é a maior facilidade de extraírem-se linhagens B e R, sem problemas de ocorrerem alelos *Rf* nas primeiras e alelos *rf* nas segundas. A teoria de síntese de populações (Dogget, 1968), enunciada para o desenvolvimento de um mínimo de duas populações simultaneamente em grupos heteróticos divergentes, é outra razão para se separar em populações B e populações R. Se o objetivo do melhoramento é somente desenvolver variedades, então não há necessidade de separar-se em populações B e R.

O desenvolvimento de populações envolve três passos: 1. Seleção dos genitores a serem cruzados. 2. Incorporação do gene de macho-esterilidade genética. 3. Intercruzamento ao acaso das progênes. O aspecto mais importante, neste desenvolvimento é a seleção dos genitores que serão cruzados. O procedimento e o número de linhagens dependem do objetivo do trabalho. É aconselhável utilizar de 10 a 20 genitores para a formação da população-base. O que se deseja é ter uma população que associe média alta e a maior variabilidade possível. A média alta implica envolver genitores que sejam bem adaptados. Já a variância alta implica envolver genitores que se complementam.

Escolhidas as linhagens, estas necessitam ser cruzadas com uma fonte que apresente genes de macho-esterilidade (ms_3). Geralmente, escolhe-se como fonte uma linhagem ou uma população B, R ou BR adaptada que contenha os genes para macho-esterilidade. Cada linhagem é cruzada com uma ou mais plantas macho-estéreis. As plantas férteis F_1 de cada um desses cruzamentos são autofecundadas para gerar progênes F_2 (Figura 1). Se a fonte de ms_3 utilizada, for muito diferente das linhagens, é necessária a realização de retrocruzamentos, para aumentar a frequência dos alelos desejados. Depois de obtido o F_2 são necessários pelo menos dois ou três ciclos de recombinação na população-base, para gerar maior variabilidade, antes de iniciar o processo de seleção.

As populações têm sido desenvolvidas com um mínimo de oito e um máximo de 80 linhagens. Geralmente, 20 a 40 linhagens cuidadosamente escolhidas são suficientes para a maioria dos objetivos. Um ou mais retrocruzamentos podem ser realizados, dependendo da adaptabilidade da

fonte de macho-esterilidade utilizada e da importância das linhagens que estão sendo usadas na síntese da população. As sementes para plantio do primeiro ciclo são obtidas tomando-se iguais quantidades de sementes de cada F_2 e realizando-se uma mistura bem cuidadosa. Planta-se em lote isolado de aproximadamente 1.000 m² em baixa densidade populacional (30.000-60.000 plantas por hectare). A baixa densidade populacional permite maior perfilhamento e, com isso, tipos de maturidade tardia podem cruzar com tipos de maturidade precoce, pois os perfilhos geralmente florescem mais tarde do que a planta principal.

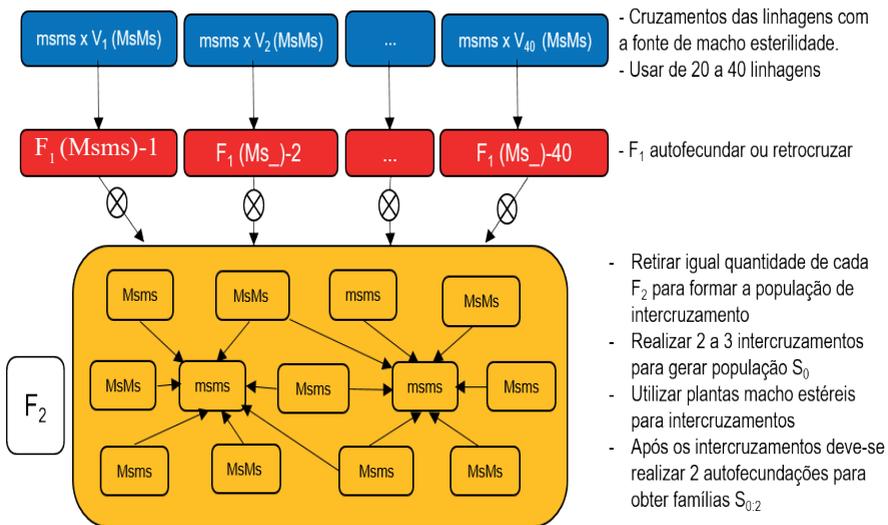


Figura 1. Esquema de síntese de uma população F₂ de sorgo, para realização do primeiro ciclo de recombinação.

As plantas macho-estéreis são identificadas e etiquetadas na fase de florescimento. Deve-se etiquetar 600 a 1.000 plantas macho-estéreis. No primeiro ciclo de intercruzamento espera-se que 25% das plantas sejam macho-estéreis. Na realidade, o número de plantas macho-estéreis encontrado geralmente é um pouco menor do que o esperado. Quando atingida a maturidade, as panículas etiquetadas são colhidas e debulhadas individualmente. Quantidades iguais de sementes de cada panícula macho-estéril são misturadas para serem utilizadas no segundo ciclo de recombinação.

O segundo ciclo é plantado de maneira igual ao primeiro ciclo. A única diferença é que o número esperado de plantas macho-estéreis aumenta

para 33,3%. As plantas macho-estéreis são etiquetadas no florescimento, e, na colheita, nova mistura de igual número de sementes de cada panícula é constituída para estabelecer um novo ciclo.

A partir do terceiro ciclo teremos 50% de plantas macho-estéreis se for seguida a mesma metodologia utilizada nos dois primeiros ciclos. No mínimo três ciclos de intercruzamento ao acaso devem ser realizados antes do início da seleção. No caso de caracteres mono ou oligogênicos, como resistência a doenças, formato de panícula, altura de plantas, alta lisina, etc., poucos ciclos são necessários. Entretanto, muitas gerações de cruzamento ao acaso são requeridas para que grupos de ligação sejam quebrados, para características mais complexas, como produtividade de grãos ou tolerância à seca.

Os métodos básicos utilizados no melhoramento de populações de sorgo são semelhantes ao sistema de melhoramento de espécies alógamas.

A seleção massal é mais simples e efetiva para caracteres de alta herdabilidade, como altura de planta e dias para o florescimento. Normalmente o campo é subdividido em aproximadamente 200 pequenas áreas de 5 m², e um igual número de plantas são selecionadas de cada área. A seleção pode ser feita em plantas macho-estéreis (escolha de panículas de polinização aberta) ou em plantas macho-férteis (escolha de melhores panículas de autofecundação). No melhoramento populacional de sorgo tem-se empregado o método de seleção recorrente em famílias $S_{0,2}$ (famílias oriundas de plantas S_0 que sofreram duas autofecundações), cujo esquema é apresentado na Figura 2.

Os genes para plantas altas e ciclo tardio são dominantes, portanto a população de intercruzamento tende a ficar alta e tardia. Pressão de seleção para evitar isso pode ser praticada (no caso de sorgo granífero), logo depois de completadas as três gerações de intercruzamentos. No caso de populações de sorgo granífero, plantas altas devem ser cortadas antes do florescimento, e devem ser etiquetadas plantas mais precoces.

A seleção recorrente recíproca é um método utilizado para melhorar a performance de cruzamentos entre duas populações. Este método pode receber prioridade no Brasil, pois facilita a produção de linhagens A/B e linhagens R adaptadas às condições brasileiras e com vigor necessário à produção de bons híbridos. Será discutida a seleção recorrente recíproca (SSR) de irmãos germanos. O método de seleção recorrente recíproca empregando meios irmãos em sorgo envolve apenas uma pequena mudança

no esquema tradicional desenvolvido para SRR-irmãos germanos.

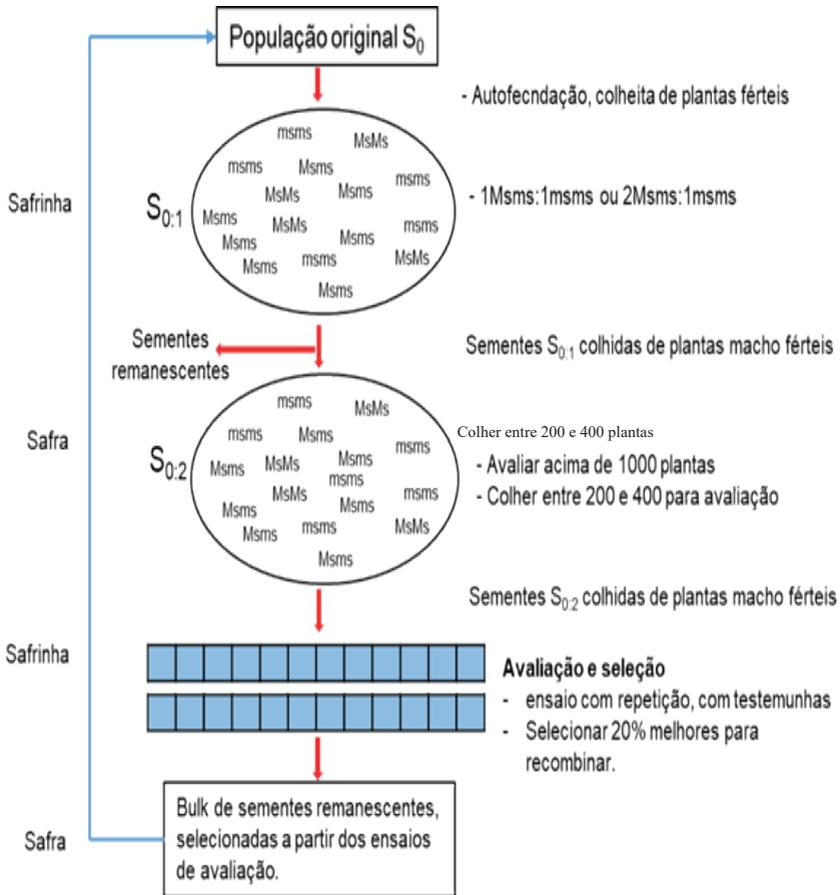
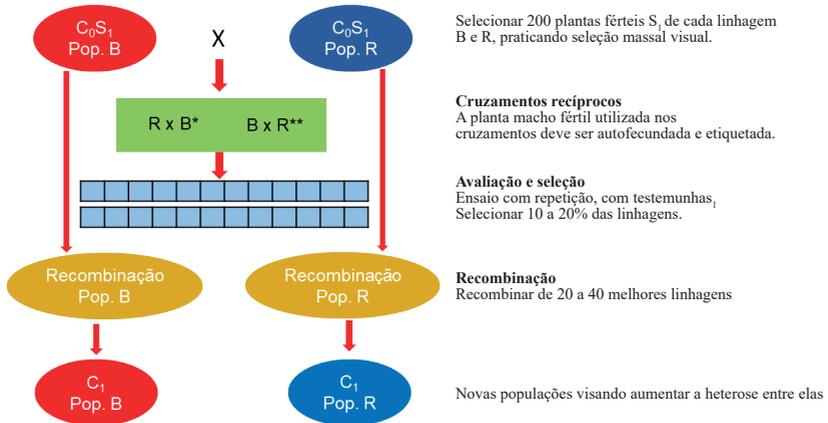


Figura 2. Esquema de seleção recorrente em famílias $S_{0,2}$ de sorgo.

O Sistema de SRR-irmãos germanos foi desenvolvido para milho, em que a primeira espiga é utilizada para realizar o cruzamento, e a segunda é autofecundada. Como isto não é possível em sorgo, recomenda-se que o procedimento indicado na Figura 3 seja utilizado. Este método pode ser utilizado em conjunto com um programa de melhoramento intrapopulacional, como o descrito na Figura 1. Note-se que neste sistema há necessidade de se utilizar duas populações e esta é uma das razões de se desenvolver populações B e populações R separadamente.

Selecionam-se 200 plantas férteis de cada população B e R, e cruzam-se com plantas macho-estéreis da outra população, visando estimar capacidade combinatória das linhagens. Os híbridos destes cruzamentos-testes são avaliados em ensaios com repetição, e se possível em mais de um local. Utilizando-se as sementes remanescentes de panículas etiquetadas, realiza-se novo ciclo de intercruzamento. A seleção de 15 a 20% das progênes leva um progresso genético considerável.

Para evitar uma imprevisível variação de altura nos testes de híbridos, um dos pais deve ter os quatro pares de genes recessivos para nanismo (quatro genes *dwarf* – 4dw) e o outro pai deve conter pelo menos três pares desses genes (três genes *dwarf* – 3dw).



* Plantas estéreis da população R são polinizadas com pólen de plantas da população B

** Plantas estéreis da população B são polinizadas com pólen de plantas da população R

¹ Avaliar a altura de planta, florescimento, tipo de panícula, doenças e pragas, rendimento de grãos, massa de 1000 grãos, e outras características de interesse da população.

Figura 3. Modelo para seleção recorrente recíproca entre irmãos germanos, em populações B e R de sorgo.

Considerando estes esquemas de seleção recorrente, o programa de Melhoramento de Sorgo da Embrapa desenvolveu algumas populações B e R, e tem realizado introduções de populações de outros países. Quatro populações foram desenvolvidas em Sete Lagoas-MG, com ganhos promissores para uso em condições tropicais, denominadas:

1. BRP12B - População brasileira não restauradora nº 12, tolerante ao alumínio.
2. BRP13R - População brasileira restauradora nº 13, tolerante ao alumínio e eficiente na absorção de fósforo.
3. BRP14R - População brasileira R de sorgo sacarino, de alto teor de açúcares.
4. BRP15R - População brasileira R de sorgo granífero, tolerante à seca.

Outro exemplo que pode ser utilizado no sorgo é o citado por Nath (1982), que realizou seleção recorrente, no início do programa de melhoramento de sorgo do ICRISAT, o qual mostrou ganhos satisfatórios no programa. No primeiro ciclo de seleção utilizaram-se progênies S_1 , e nos ciclos subsequentes progênies S_2 foram usadas. A intensidade de seleção mudava de ciclo para ciclo, mas, de 200 progênies testadas, aproximadamente 30 a 40 (L_1 a L_{40}) eram recombinadas para reconstituir a população. Além das progênies S_2 , um bulk de progênies era semeado em duas datas diferentes, ao redor do campo de cruzamento, para facilitar a coincidência do florescimento.

Na Figura 4 é ilustrado o esquema de seleção de progênies S_2 utilizado em sorgo. A seleção teve por objetivo melhorar a população para as características rendimento de grãos e estabilidade, qualidade de grãos, resistência a insetos-pragas, tolerância a doenças e à seca. As progênies eram cultivadas em ambiente diverso, de forma a praticar a seleção em condições naturais. Se a população não tinha variabilidade para determinada característica, linhagens adicionais eram incorporadas nela. Era utilizado o método de panícula por fileira, sendo plantadas de 1.000 a 2.000 progênies, realizando seleção de 40%.

As progênies selecionadas eram avaliadas em ensaios sem repetição, para extração de progênies S_2 , ou voltavam para novo ciclo de intercruzamento. Nesta etapa é muito válida a experiência do melhorista para saber se a população já possui progênies que possam ser exploradas como linhagens. Se não, o recomendado é seguir com novos intercruzamentos. As progênies S_2 são avaliadas em ensaios com repetições em quatro ou cinco locais.

Este esquema está mais direcionado para obtenção de variedades. Se o objetivo é desenvolver linhagens, é recomendado que estas progênies S_2 selecionadas sejam autofecundadas, utilizando sementes remanescentes, e somente em S_3 elas entrem no programa de cruzamentos testes.

A seleção simultânea para várias características reduz o ganho para rendimento de grãos. Na seleção simultânea é ideal que se utilize algum índice de seleção, o que atualmente é bastante prático com o uso da estatística e recursos computacionais disponíveis. A seleção também pode ser realizada para algumas características na primeira safra (florescimento, altura de planta, cor de grão, tipo e formato de panícula) e para outras características na segunda safra (rendimento de grãos, tolerância à seca, tolerância a doenças).

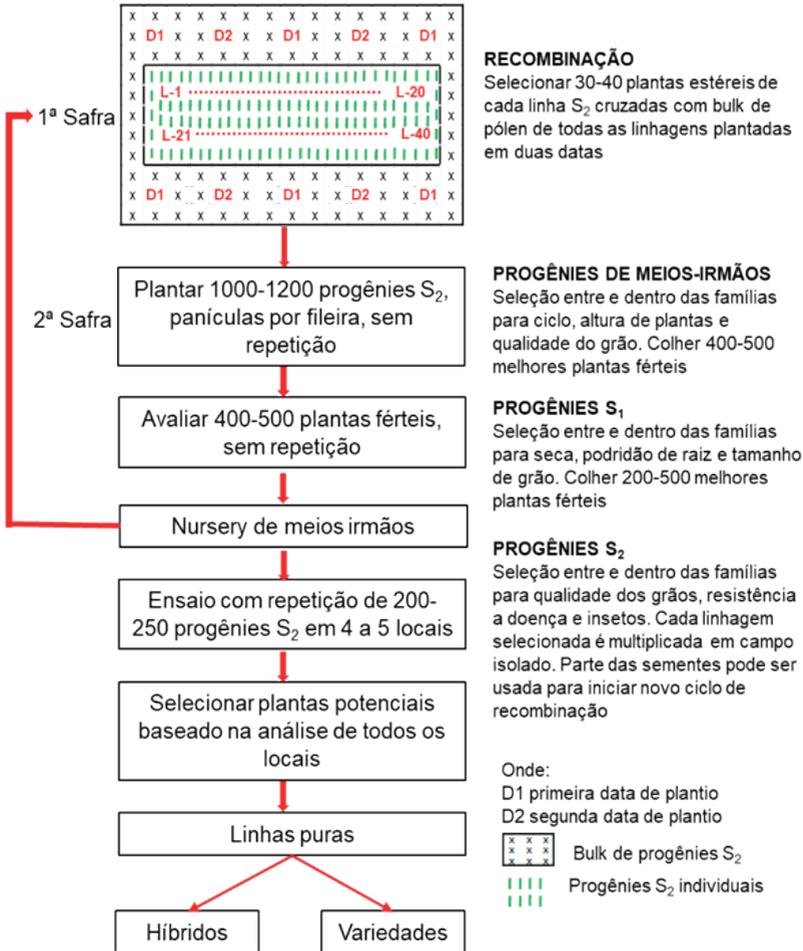


Figura 4. Esquema de seleção de progênies S_2 utilizado pelo programa de melhoramento do ICRISAT.
 Fonte: Nath (1982).

Com o advento da biotecnologia, novos modelos de seleção recorrente foram propostos, como Seleção Recorrente Assistida por Marcadores (MARS) e Seleção Recorrente Genômica Recíproca (SRGR).

A MARS inclui a identificação e seleção de vários QTLs (20 ou mais) para características complexas em uma única população. Ribaut et al. (2010) apresentam um programa de seleção recorrente assistido por marcadores moleculares para a identificação e seleção de múltiplas regiões genômicas envolvidas na expressão de características complexas. O esquema envolve o melhoramento de uma população F_2 segregante, por um ciclo de seleção assistida por marcador (com dados fenotípicos e baseado nos marcadores) seguido comumente por dois ou três ciclos de seleção baseada somente nos marcadores. Em programas contínuos de linhagens, a informação genotípica antes do florescimento é usada para seleção assistida por marcador e polinização controlada. No MARS, os melhoristas aproveitam as informações de QTL geradas em suas populações de interesse para desenvolver linhagens superiores com uma combinação ótima de alelos favoráveis originados de ambos os pais. Os QTLs que impactam as principais características de interesse são identificados dentro das populações de melhoramento e acumulados por meio de cruzamentos sucessivos usando apenas seleção genotípica. As linhagens recombinadas são então submetidas a uma triagem fenotípica final para selecionar as melhores variedades a serem liberadas.

Fritsche-Neto et al. (2012) apresentam um modelo de SRGR para milho que pode ser adaptado ao sorgo. Primeiramente é gerada a população de estimação, na qual serão realizadas a genotipagem e a fenotipagem dos genótipos avaliados. No caso da SRGR, a seleção deve ser realizada dentro de cada grupo heterótico, mas baseada no desempenho dos híbridos interpopulacionais. No caso do sorgo, deve-se considerar população B como um grupo heterótico e população R como outro grupo heterótico. Nessa fase, podem ser genotipadas as linhagens genitoras e fenotipados os híbridos obtidos do cruzamento entre elas. A partir desses dados, são estimados os valores genéticos dos marcadores e o número desses que maximizam a acurácia seletiva para cada caráter de interesse. A validação é realizada nos mesmos híbridos, mas de forma independente, por meio do procedimento Jacknife (Heltshe; Forrester, 1983). Finalmente, faz-se a seleção genômica dentro de cada grupo heterótico, a partir dos resultados obtidos na população de descoberta e de validação.

Na SRGR as populações seriam geradas pela livre recombinação das

melhores linhagens genitoras dentro de cada grupo heterótico. Após a sua obtenção, elas são semeadas em campo, e de cada planta retira-se, no estado juvenil, uma amostra foliar para extração de DNA e a genotipagem com os marcadores identificados no processo de estimação e validação. As plantas são então classificadas em razão dos seus valores genéticos genômicos dados pelas marcas que apresentam em seu genótipo. As consideradas superiores para a composição de híbridos interpopulacionais são identificadas antes do florescimento, eliminando-se as demais. Com isso, há coincidência entre as unidades e gerações de seleção e de recombinação em apenas um ciclo em campo. Além disso, a seleção é realizada no indivíduo, em ambos os sexos, e não precisa ser feita no ambiente ideal de avaliação ou cultivo. Desse modo, há aumento na acurácia seletiva, nos ganhos por unidade de tempo e, conseqüentemente, na eficiência do processo de melhoramento (Fritsche-Neto et al., 2012).

Considerações Finais

O método descrito para síntese de populações e os vários métodos de melhoramento de populações permitem, aos melhoristas, a oportunidade de utilizar eficientemente grande número de linhagens da coleção mundial e de programas de melhoramento. Oferecem uma maior chance de quebrar grupos de ligação e aumentar assim a recombinação genética, o que não ocorre, ou ocorre muito pouco, em condições naturais ou num programa de melhoramento convencional. Os vários esquemas apresentados permitem o melhoramento de populações, das quais, a qualquer momento, linhagens melhoradas podem ser extraídas para utilização em combinações híbridas ou diretamente como variedade.

O programa de melhoramento de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo desenvolve suas atividades principalmente para a obtenção de linhagens com boa capacidade de combinação e valores agregados para tolerância à seca e à alta temperatura; eficiência na utilização de nutrientes; ciclo e porte adequados; resistência às principais doenças e pragas; e melhor qualidade do produto. Essas atividades envolvem parcerias nacionais e internacionais, com universidades, Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia, centros de pesquisa da Embrapa, empresas estaduais de pesquisa e empresas do setor de sementes.

Referências

- BHOLA, N. Population breeding techniques in sorghum. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM, 1981, Patancheru. **Sorghum in the eighties: proceedings**. Patancheru: ICRISAT, 1982.
- DOGGET, H. Mass selection systems for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Crop Science**, v. 8, n. 3, p. 391-392, 1968.
- DOGGET, H.; EBERHART, S. A. Recurrent selection in sorghum. **Crop Science**, v. 8, n. 1, p. 119-121, 1968.
- FRITSCHÉ-NETO, R.; RESENDE, M. C. V.; MIRANDA, G. V.; VALE, J. C. Seleção genômica ampla e novos métodos de melhoramento do milho. **Revista Ceres**, v. 59, n. 6, p. 794-802, 2012.
- GARDNER, C. O. Development of superior populations of sorghum and their role in breeding programs. In: RAO, G. P.; HOUSE, L. R. (ed.). **Sorghum in the seventies**. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1972. p. 180-196.
- GOMES, L. R. R.; PEREIRA, M. M. M.; MENEZES, C. B.; SIMON, G. A.; TARDIN, F. D.; CARDOSO, M. J. Performance agronômica de híbridos de sorgo granífero estimada pelo método GGE biplot. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 5, p. 42-56, 2019.
- HELTSHE, J. F.; FORRESTER, N. E. Estimating species richness using the Jackknife procedure. **Biometrics**, v. 39, n. 1, p. 1-11, 1983.
- MARTINS, L. S.; MENEZES, C. B.; SIMON, G. A.; SILVA, A. G.; TARDIN, F. D.; GONÇALVES, F. H. Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de sorgo granífero no sudoeste de Goiás. **Revista Agrarian**, v. 9, n. 34, p. 333-347, 2016.
- MENEZES, C. B. de; SILVA, A. F. da; TARDIN, F. D. Sorgo safrinha. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 293-308. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

MOHAMED, A. B. **Evaluation of improvement in sorghum random mating population.** 1983. 93 p. Tese (Doutorado) - University of Nebraska, Lincoln, 1983.

NATH, B. Population breeding techniques in sorghum. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM, 1981, Patancheru. **Sorghum in the eighties:** proceedings. Patancheru: ICRISAT, 1982. p. 421-434.

REDDY, P. S.; REDDY, V. S. History of sorghum improvement. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; VENKATESH BHAT, B.; TONAPI, V. A. (Ed.). **Breeding sorghum for diverse end uses.** Oxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 61-75. (Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition).

REDDY, B. V. S.; KUMAR, A. A. **Population improvement in sorghum.** Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2005.

RIBAUT, J. M.; VICENTE, M. C.; DELANNAY, X. Molecular breeding in developing countries: challenges and perspectives. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 13, n. 2, p. 213-218, 2010.

RODRIGUES, J. A. S.; MENEZES, C. B. de; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; TABOSA, J. N. Utilização do sorgo na nutrição animal. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 229-246. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. (Org.). **Melhoramento de espécies cultivadas.** 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. v. 1, p. 429-466.

TEODORO, P. E.; ALMEIDA FILHO, J. E.; DAHER, R. F.; MENEZES, C. B. de; CARDOSO, M. J.; GODINHO, V. de P. C.; TORRES, F. E.; TARDIN, F. D. Identification of sorghum hybrids with high phenotypic stability using GGE biplot methodology. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 2, gmr15027914, 2106.

Capítulo 8

Melhoramento Genético de Sorgo Granífero

Cicero Beserra de Menezes

Karla Jorge da Silva

Crislene Vieira dos Santos

Origem e Importância do Sorgo Granífero

O sorgo teve origem no nordeste da África, na região próxima à linha equatorial, sendo muitas cultivares sensíveis à duração e à temperatura do dia. Para ser cultivado nas Américas (Estados Unidos, México, Argentina e Brasil), o sorgo foi submetido a um programa de conversão, para insensibilidade ao fotoperíodo, seleção de plantas mais baixas e maior rendimento de grãos (Smith; Frederiksen, 2000; Rooney, 2004).

Com o aumento das pesquisas, o sorgo se tornou o quinto cereal mais cultivado no mundo, após trigo, milho, arroz e cevada. Atualmente é cultivado em todos os continentes, tendo maior expressão em regiões semiáridas, com distribuição irregular de chuvas, mas no Brasil tem maior expressão em áreas de Cerrado, com condições melhores que o semiárido. Na África e na Ásia, o sorgo é bastante usado para alimentação humana. Já nas Américas, o sorgo é mais utilizado para alimentação animal na forma de rações e silagem. Na Figura 1 encontra-se a série histórica de área de sorgo granífero no Brasil nos últimos 40 anos.

No Brasil, o sorgo granífero encontra ótimas condições climáticas para desenvolvimento. O plantio da cultura se concentra na região do Cerrado em sucessão à soja de verão (fevereiro), no Sul em plantios de verão (novembro) e no Nordeste em plantios no início das chuvas (fevereiro/março). Todo plantio é feito em condições de sequeiro.

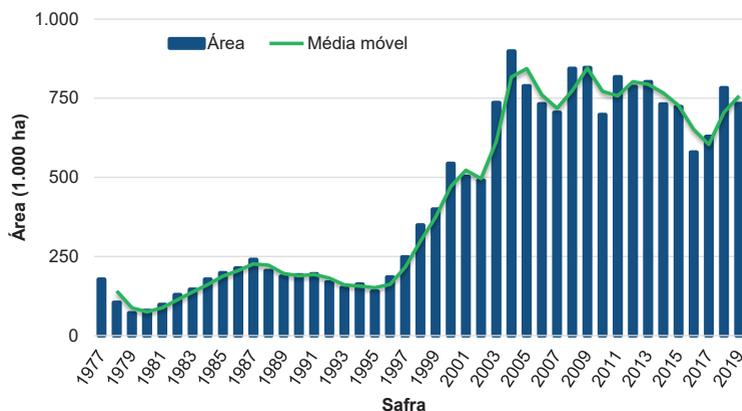


Figura 1. Série histórica de área de sorgo granífero no Brasil. 2020.
Fonte: Acompanhamento da Safra Brasileira [de] Grãos (2019).

As maiores produtividades são obtidas quando se faz o planejamento da safra, escolhendo cultivares adaptadas a cada região, realizando adubação, manejo de plantas daninhas, doenças e pragas. Quanto mais cedo o plantio na segunda safra maior será a produtividade de grãos. Plantios tardios em condições de sequeiro tendem a reduzir drasticamente a produtividade das lavouras, em razão da falta de água durante a fase de enchimento de grãos. Para o sucesso desta estratégia de ação, é de extrema importância que os produtores utilizem cultivares de sorgo de ciclo precoce e mais tolerantes à seca (Coelho et al., 2002; Batista et al., 2019; Menezes, 2020).

Taxonomia

O gênero *Sorghum* pertence à tribo *Andropogoneae*, família *Poaceae* (Gramineae) (De Wet, 1978). O gênero *Sorghum* é muito diverso, existindo cruzamentos entre sorgos cultivados e selvagens, dificultando a classificação correta deles. Em 1961 foi proposto o nome *Sorghum bicolor* (L.) Moench para o sorgo cultivado (Clayton, 1961). De Wet (1978) reconheceu cinco seções do gênero *Sorghum*: *Stiposorghum*, *Parasorghum*, *Sorghum* (cultivado), *Heterosorghum* e *Chaetosorghum*. Na seção *Sorghum* são reconhecidas três espécies: *S. halepense* (L.) Pers ($2n = 40$), espécie rizomatosa perene; *S. propinquum* (Kunth) Hitchc. ($2n = 20$), espécie rizomatosa; e *S. bicolor* (L.)

Moench ($2n = 20$), que se divide em três subespécies: *bicolor* (todos os sorgos graníferos), *drummondii* (derivada ou hibridação entre sorgos graníferos e seus parentes selvagens próximos) e *arundinaceum* (todos os progenitores selvagens de sorgos graníferos) (Figura 2). Esta última foi dividida em quatro ecotipos: *aethiopicum*, *virgatum*, *arundinaceum* e *verticilliflorum*. A subespécie *bicolor* foi dividida em cinco raças básicas (bicolor, guinea, caudatum, kafir e durra) e 15 raças híbridas que combinam características de pelo menos duas das raças básicas. São diferenciadas pela forma do grão, das glumas e da panícula (House, 1985; Ejeta; Grenier, 2005).

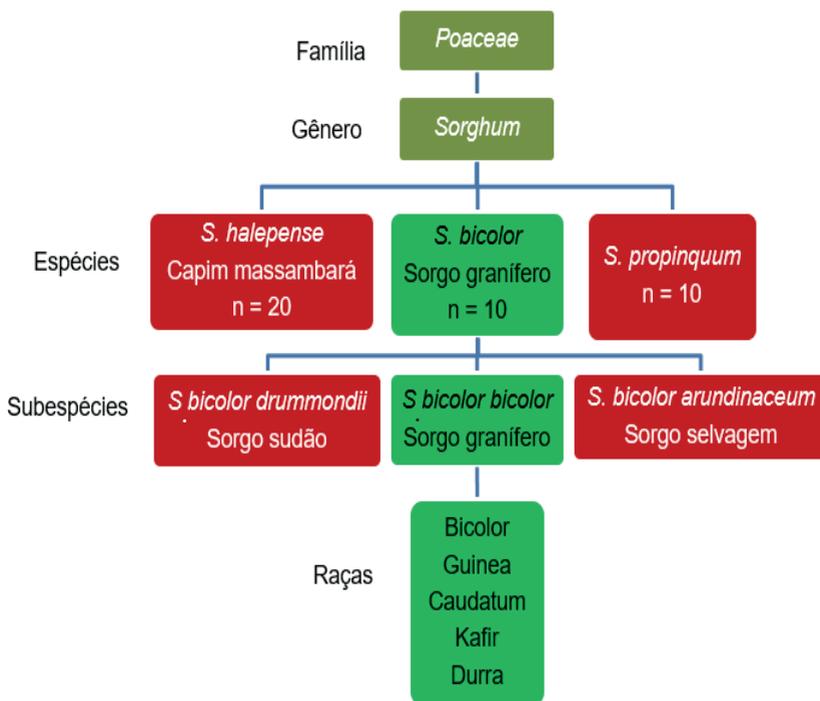


Figura 2. Família, gênero, espécie, subespécie e raças de sorgo (De Wet, 1978).

Todas as raças de *S. bicolor* são diploides ($2n = 2x = 20$). O genoma de *S. bicolor* (genótipo BT × 623) foi sequenciado (Paterson et al., 2009), e possui aproximadamente 730 Mpb (mega pares de base), que é vinte vezes menor que o do trigo, três vezes menor que o do milho, mas quase 75% maior que o do arroz e contém 34.496 genes putativos (Arumuganathan; Earle 1991; Paterson et al., 2009).

Objetivos do Melhoramento do Sorgo Granífero

O melhoramento de sorgo granífero no Brasil busca o desenvolvimento de cultivares adaptadas ao plantio na segunda safra nas regiões do Cerrado, em sucessão à soja. Para esta finalidade, diversas características devem ser observadas no lançamento de novas cultivares, sempre buscando aumentar a produtividade. Como suporte a isso, o melhoramento busca reduzir os danos causados por estresses abióticos (seca, acidez do solo, baixas temperaturas no inverno na região Centro-Sul e deficiência nutricional) e bióticos (antracnose, míldio, ergot, helmintosporiose, podridão no colmo, *Spodoptera frugiperda* e pulgão).

No Brasil, encontram-se algumas variedades no mercado, mas basicamente se utiliza híbridos simples para plantio. Os híbridos têm superioridade de rendimento distinta em comparação com as melhores variedades (Maunder, 1972; Rao, 1972; Doggett, 1988; Rooney, 2004; Santos, 2020). Mindaye et al. (2016) testaram 139 híbridos em três ambientes na Etiópia (terras baixas, intermediárias a altas), encontrando heterobeltiose média de 19%, 16% e 52% respectivamente nestes ensaios, porcentagem equivalentes a 1.160 kg ha⁻¹, 698 kg ha⁻¹ e 2.031 kg ha⁻¹. No Brasil, Santos (2020) avaliou 25 híbridos de sorgo nas gerações F₁ e F₂, para estimar a depressão por endogamia. Com isso foi possível concluir que o uso de sementes de híbridos F₁ é muito mais atrativo para o produtor, haja vista a acentuada depressão endogâmica que ocorre nos híbridos F₂, com redução de até 40% na produtividade de grãos (Figura 3).

Os métodos de melhoramento do sorgo levam em conta os objetivos de curto e longo prazo visando ao aumento da produtividade e manutenção da diversidade genética. Apesar de ser autógama, a macho-esterilidade no sorgo permite o uso dos mesmos métodos de melhoramento de plantas alógamas, como melhoramento populacional e desenvolvimento de híbridos.

Os principais pontos no melhoramento de sorgo são (1) desenvolvimento de híbridos tropicais, insensíveis ao fotoperíodo; (2) desenvolvimento de linhagens e produção de híbridos para explorar heterose para produção de grãos; (3) diversificação da base genética de cultivares usando germoplasma exótico, principalmente introduzido dos Estados Unidos, da Índia e da Austrália; (4) melhoramento populacional para aumentar os alelos favoráveis das características desejáveis, como produtividade, precocidade, tolerância à seca, resistência a doenças e pragas.

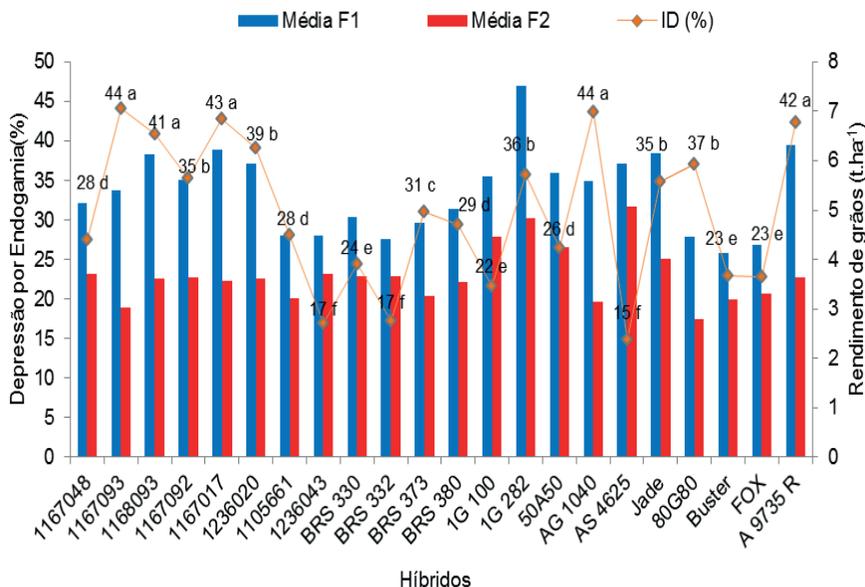


Figura 3. Depressão por endogamia (ID%) em híbridos de sorgo para rendimento de grãos.

Rendimento de Grãos e Características de Panícula

Maior rendimento de grãos continua sendo o grande objetivo dos programas de melhoramento de sorgo. São poucas as empresas que possuem programas de melhoramento local no Brasil, algumas continuam importando linhagens e híbridos principalmente dos Estados Unidos, da Austrália e da Argentina. Existem algumas particularidades do clima tropical que aumentam a necessidade de melhoramento local de sorgo, principalmente pela temperatura e umidade do ar, comprimento do dia, tipos de solo, resistência a doenças e pragas.

Na Figura 4 são apresentadas as médias de rendimento de grãos dos últimos cinco anos, dos híbridos que servem de testemunhas nos ensaios da Associação Paulista de Produtores de Sementes e Mudanças (APPS). Estes ensaios compreendem uma rede nacional de avaliação em que todas as empresas testam seus híbridos em fase de pré-lançamento.

Portanto, para se pensar em lançar no mercado nacional, um híbrido de sorgo precisa estar próximo a estes valores, aceitando produtividades mais baixas para aqueles híbridos muito precoces. Estes ensaios são na sua



Figura 4. Médias de rendimento de grãos dos últimos cinco anos

grande maioria conduzidos em condições de sequeiro, simulando condição real, semelhante à que ocorre no local do produtor.

O rendimento de grãos, sendo característica quantitativa, é muito afetado pelas condições ambientais e apresenta baixa herdabilidade, e a seleção baseada somente no rendimento em si não é desejável. Portanto, a identificação de características que contribuam para o rendimento, como número de grãos, tamanho de grãos, peso de 1.000 grãos, índice de colheita e várias outras características morfofisiológicas que influenciam indiretamente o rendimento da cultura, é mais importante, e o melhoramento dessas características traz ganho para o programa.

Ao avaliar o desempenho dos híbridos e sua adaptação a determinado local, é importante entender as relações entre rendimento de grãos, ciclo de maturação e altura de plantas. Numa condição sem estresse o rendimento de grãos possui correlação positiva com maturidade e altura de plantas. No entanto, numa condição de estresse hídrico, como ocorre na segunda safra no Brasil, o rendimento é maior em híbridos mais precoces, pois muitas vezes eles escapam da seca por terem ciclos mais curtos. Portanto é importante selecionar híbridos tardios para o início da segunda safra e híbridos superprecoces para plantios no final da safra.

Ainda com relação ao ciclo, grande parte dos acessos da coleção

mundial de sorgo (aproximadamente 75%) é originária de regiões tropicais, com dias curtos. As plantas são altas e tardias (sensíveis ao fotoperiodismo), necessitando de conversão para insensibilidade ao fotoperíodo. Muitos acessos de sorgo que foram introduzidos dos Estados Unidos já passaram por este processo de conversão. Basicamente, o programa de conversão consiste em um processo de retrocruzamento, sendo o tipo baixo e precoce o progenitor recorrente. Após três ou quatro ciclos de retrocruzamento, o tipo exótico é recuperado, porém com porte baixo e essencialmente insensível ao fotoperíodo. Esse material tem sido de grande interesse para os programas de melhoramento de vários países, uma vez que disponibiliza germoplasma de forma mais elaborada como fonte de resistência a doenças, a pragas, ao acamamento, a tolerância à seca, a qualidade de grãos, ampla adaptação, alto potencial de rendimento de grãos e tipos para uso na alimentação humana.

O rendimento de grãos é positivamente correlacionado com altura de plantas, no entanto híbridos muito altos dificultam a colheita mecanizada e tendem a acamar, principalmente se tiverem panículas grandes e pesadas. A altura desejada de um híbrido de sorgo granífero situa-se entre 130 e 150 cm (Santos et al., 2005). A altura de plantas é controlada por quatro genes independentes: dw_1 , dw_2 , dw_3 e dw_4 . Os genes dw_1 e dw_2 afetam o comprimento do internódio, dw_3 afeta o número de internódios, já o gene dw_4 afeta o comprimento da panícula (Goud; Vasudeva-Rao, 1977). Para o sorgo granífero, ocorre a seleção de plantas de menor porte, com três alelos anões ($dw_1dw_2dw_3dw_4$, por exemplo), que se apresentam em homozigose recessiva.

O tamanho e o número de grãos são correlacionados negativamente. Alguns programas de melhoramento superaram com êxito essa correlação negativa selecionando fêmeas de híbridos com alto número de grãos, para cruzar com machos (linhagens R) com grãos grandes. Os híbridos F_1 maximizam o número e o tamanho dos grãos, permitido pela correlação negativa entre as duas características. Boyles et al. (2016) identificaram loci não ligados geneticamente para número e peso de grãos, sugerindo que essas características podem ser manipuladas de forma independente para aumentar o rendimento de grãos de sorgo. Eles relataram ainda que as raças primárias, *caudatum* e *kafir* apresentaram maior número médio de grãos por planta, peso de 1.000 grãos e rendimento geral por planta, enquanto *bicolor* teve a menor média para os três componentes de rendimento. Isso apoia o fato de *caudatum* e *kafir* serem as raças mais comuns usadas para desenvolver híbridos comerciais de sorgo granífero (House, 1985).

Para aumentar a adaptação do sorgo às diferentes condições ambientes em que ele é plantado, o melhoramento deve focar também na mitigação de estresses bióticos (doenças e insetos-pragas) e abióticos (seca, alumínio e nutrientes).

Características Focadas pelo Melhoramento

O estresse hídrico é o grande desafio da produção de sorgo em todo o globo. Embora o sorgo possua excelente resistência à seca em comparação com a maioria de outros cereais, melhorar sua resistência à seca aumentaria e estabilizaria a produção de grãos e alimentos em regiões de baixa pluviosidade, como na região Nordeste, ou com distribuição irregular de chuvas, como na região do Cerrado durante a segunda safra (Menezes et al., 2018).

A resistência à seca é a expressão fenotípica de várias características morfológicas e mecanismos fisiológicos, incluindo escape à seca (precocidade), prevenção da desidratação (cera na folha, sistema radicular profundo, enrolamento das folhas) e tolerância à desidratação (fechamento de estômatos, ajustamento osmótico) (Ludlow, 1993; Blum, 2004; Fracasso et al., 2016). Portanto, a resistência à seca no sorgo é uma característica complexa afetada pela interação de fatores ambientais e fisiológicos da planta. Na planta de sorgo, o estresse pode ocorrer em duas épocas, em pré e em pós-florescimento. No pré-florescimento, a expressão do estresse ocorre quando as plantas estão na fase de emborrachamento e durante o desenvolvimento da panícula, na fase de diferenciação da panícula ao florescimento (estádio E4-E5). Já em pós-florescimento, o estresse se expressa quando as plantas estão no estágio de enchimento de grãos (estádio E6-E7) (Nguyen et al., 1997). Ambos os estresses reduzem o rendimento de grãos (Figura 5).

O estresse em pré-florescimento reduz a altura da planta, acelera o florescimento e aumenta o ângulo de raiz em comparação com o estresse em pós-florescimento. Se o estresse ocorrer em pré-florescimento e a umidade voltar, o grão consegue crescer normalmente; já no estresse pós-florescimento o tamanho do grão é bastante afetado. Portanto, a redução da produtividade causada pelo estresse em pré-florescimento deve-se mais à redução do número de grãos na panícula, e a redução quando o estresse ocorre no pós-florescimento deve-se mais à redução no tamanho do grão. O índice de clorofila da planta reduz com o corte da irrigação no pré-florescimento e volta a aumentar após a volta da irrigação, mostrando recuperação na

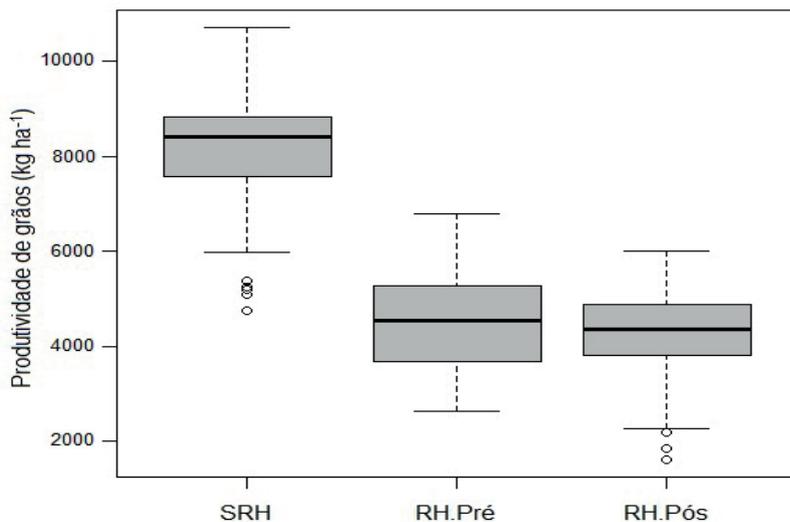


Figura 5. Boxplot para rendimento de grãos (kg ha^{-1}) referente a 25 híbridos de sorgo avaliados em condições sem restrição hídrica (SRH), com restrição hídrica em pré-florescimento (RH.Pré) e restrição hídrica em pós-florescimento (RH.Pós).

capacidade fotossintética da planta de sorgo. No estresse pós-florescimento o índice de clorofila reduz significativamente aos 30 dias após o estresse, afetando o enchimento do grão, com conseqüente queda na produtividade (Figura 6).

No Capítulo 8 são descritos alguns métodos de fenotipagem de sorgo para tolerância à seca.

Resistência a Doenças

Para se iniciar um programa de melhoramento para resistência a doenças é importante antes analisar: (1) se a doença tem importância econômica suficiente, (2) se há informações suficientes sobre a natureza do sistema hospedeiro-patógeno e sobre as técnicas de avaliação, (3) se boas fontes de resistência estão disponíveis e (4) se o ganho econômico esperado para o programa ocorrerá dentro de um determinado período.

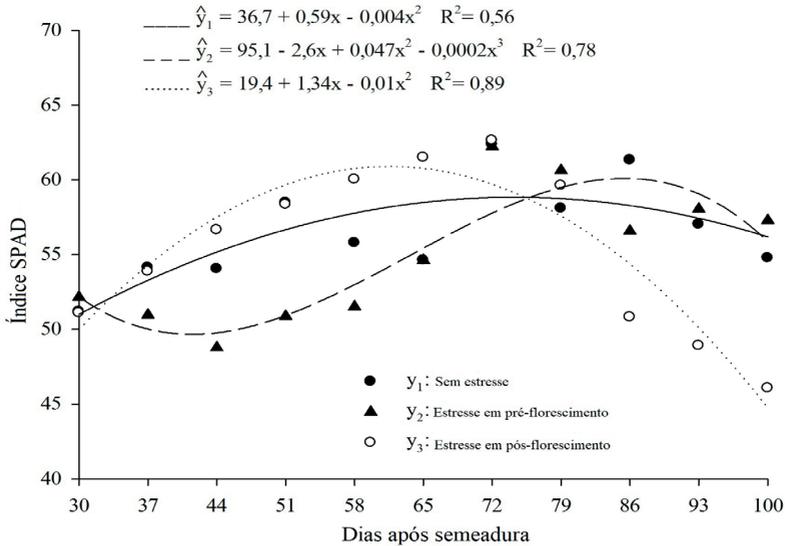


Figura 6. Valores médios do Índice SPAD aos 37, 44, 51, 58, 65, 72, 79, 86, 93 e 100 dias após a semeadura, referente à avaliação de 25 híbridos de sorgo granífero cultivados sem estresse hídrico (Y_1), com estresse hídrico em pré-florescimento (Y_2) e com estresse hídrico em pós-florescimento (Y_3).

As principais doenças do sorgo são antracnose (*Colletotrichum sublineolum*), míldio (*Peronosclerospora sorghi*), helmintosporiose (*Exerohilum turcicum*), ferrugem (*Puccinia purpurea*) e ergot (*Claviceps africana*). Outras doenças menos prejudiciais, mas que merecem serem observadas, são cercosporiose (*Cercospora fusimaculans*), mancha-alvo (*Bipolaris sorghicola*), mancha-zonada (*Gloeocercospora sorghi*), mancha-de-ramulispora (*Ramulispora sorghi*) e vírus do mosaico-da-cana-de-açúcar (SCMV).

A maioria dos programas de melhoramento precisa possuir estrutura física para trabalhar com resistência a doenças, pelo menos com aquelas doenças mais importantes. Geralmente, as cultivares-elites e de alto rendimento de grãos são cruzadas com as fontes de resistência a doenças. Se a fonte de resistência é uma linhagem de boa qualidade de planta, como boa altura, bom ciclo, boa panícula, pode-se usar o método de pedigree para extrair novas linhagens. Infelizmente, estas fontes de resistência costumam apresentar baixa produção de grãos e possuem panículas pequenas,

necessitando o uso de retrocruzamentos para os parentais-elites para recuperação do genoma-elite.

A resistência a doenças em sorgo tem que atuar reduzindo a taxa de desenvolvimento de doenças durante o ciclo da cultura e ser efetiva contra todas as raças de determinado patógeno. A resistência dilatária associada à combinação de linhagens com capacidade de limitar a capacidade de adaptação do patógeno é estratégia para a obtenção de resistência de maior durabilidade e estabilidade em sorgo. A formação de pirâmides de genes de resistência em sorgo é possível mediante a combinação de linhagens na produção de híbridos, que tenham resistência genética herdada de diferentes fontes.

Os métodos de pedigree, de retrocruzamentos e de populações podem ser utilizados com sucesso no desenvolvimento de cultivares geneticamente resistentes a doenças. Quando plantas resistentes podem ser identificadas individualmente, o melhoramento por meio do método de populações é uma técnica de alta eficiência. Outros fatores a serem considerados são a natureza genética da resistência, as características agrônômicas da linhagem utilizada como fonte de resistência e o método de melhoramento mais utilizado pelo melhorista.

A aplicação de técnicas de biologia molecular representa importante ferramenta para o desenvolvimento de cultivares de sorgo resistentes a doenças. Vários genes de resistência foram já mapeados, e a seleção assistida por marcadores pode incorporar a resistência desejada mais rapidamente do que os métodos convencionais. Essa seleção pode também ser de grande utilidade na piramidação de genes de resistência a doenças.

Técnicas eficientes de seleção de grande número de genótipos de sorgo é um ponto crítico para o sucesso de qualquer programa de melhoramento de sorgo para resistência a doenças. A seleção feita em campo é muito efetiva para a avaliação, por exemplo, do míldio e da antracnose, duas das mais importantes doenças da cultura do sorgo no Brasil.

Resistência a Insetos-Pragas

Para o sorgo granífero, são cinco espécies de insetos-pragas consideradas pragas primárias e que causam prejuízos para essa cultura. Destacam-se as lagartas elasmó e do cartucho (*Elasmopalpus lignosellus* e *Spodoptera frugiperda*), broca-da-cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*), pulgão-verde (*Schizaphis graminum*) e, de ocorrência mais recente, a

Helicoverpa armigera. Desde a safra 2018/2019 apareceu no Brasil o pulgão-da-cana-de-açúcar (*Melanaphis sacchari*), com danos elevados nas lavouras. No Capítulo 14 são descritas as principais pragas do sorgo e suas formas de fenotipagem.

Tolerância ao Alumínio

Mais de 90% da área nacional de sorgo está no bioma Cerrado, como cultura de sucessão à soja, na segunda safra. As vegetações remanescentes de Cerrado que existem atualmente desenvolveram-se sobre solos muito antigos e intemperizados, que estão quase sempre associados com elevada acidez. Esses solos são caracterizados, além da elevada acidez, por apresentarem alta saturação de alumínio, baixa disponibilidade de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, zinco, boro e cobre e, em sua maioria, reduzida capacidade de retenção da água (Silva; Malavolta, 2000).

O alumínio é um dos metais mais abundantes na crosta terrestre, sendo liberado na solução do solo em condições ácidas, assumindo formas fitotóxicas, como o Al^{3+} . A toxidez causada pelo Al afeta o desenvolvimento das plantas e, em particular, inibe o crescimento radicular, tornando as raízes curtas e grossas, sendo o ápice radicular o alvo primário do Al (Kochian, 2015). Solos com elevada saturação de alumínio, associada com a deficiência hídrica, reduzem drasticamente a produtividade de grãos, podendo inviabilizar áreas de cultivo ou elevar muito o custo de produção delas. Além de impedir o desenvolvimento radicular das plantas, o alumínio no solo interfere na absorção de fósforo, cálcio e magnésio, contribuindo também para a adsorção do fósforo no solo.

Uma abordagem para o cultivo em áreas com alta saturação de alumínio é a utilização de cultivares tolerantes. O melhoramento genético possibilita o aumento da produtividade sem ocasionar uma expansão agrícola da área e isto seria viável tanto economicamente quanto ambientalmente. A seleção de híbridos de sorgo com esta característica seria uma alternativa eficiente para a melhor exploração das áreas que possuem alta saturação de alumínio (Magalhães et al., 2007; Caniato et al., 2014; Menezes et al., 2014).

Em sorgo, o gene SbMATE codifica uma proteína transportadora da família MATE (Multidrug and Toxic Compound Extrusion Family), que confere tolerância a Al por meio da liberação de citrato ativada por Al nos ápices radiculares (Magalhães et al., 2007). No entanto, a introgressão assistida por marcadores do loco AltSB (que contém o gene SbMATE)

em uma linhagem sensível resultou em uma transferência incompleta da tolerância ao Al em comparação ao parental doador tolerante, que foi coincidente com uma redução nos níveis de expressão do gene SbMATE. Isso sugere a atuação de fatores regulatórios que controlam a expressão do gene SbMATE (Melo et al., 2013).

Polimorfismos de nucleotídeo único (*Single Nucleotide Polymorphisms, SNPs*) associados à tolerância ao alumínio e a expressão do gene SbMATE foram mapeados na região de aproximadamente 51 a 54 Mpb do cromossomo 9 do sorgo. Uma análise qualitativa dessa região baseada em *yeast one hybrid* (Y2H) identificou dois fatores de transcrição capazes de ativar o promotor do gene SbMATE: um fator de transcrição da família WRKY (SbWRKY1) e um gene que codifica uma proteína que contém um domínio do tipo zinc finger-DHHC (SbZNF1) (Melo et al., 2019). A determinação do quanto cada fator de transcrição afeta a expressão do gene SbMATE pode ser estimada avaliando-se a expressão do gene SbMATE e a tolerância ao alumínio em linhagens recombinantes endogâmicas (Recombinant Inbred Lines, RILs) com diferentes combinações dos alelos parentais de SbWRKY1 e SbZNF1 (haplótipos).

No mercado nacional já existem híbridos tolerantes ao alumínio e novos estudos continuam sendo desenvolvidos na busca de outras fontes de tolerância e no efeito destes genes na produção de grãos em condições de elevada saturação de alumínio.

Qualidade Nutricional

O melhoramento para qualidade nutricional deve considerar a forma de consumo dos grãos, se para alimentação animal ou humana, apesar de algumas características comuns serem importantes para ambos os grupos. No Brasil, como o grão de sorgo é usado basicamente para alimentação animal, é importante avaliar os fatores que reduzem a digestibilidade da proteína, como interação com taninos e polimerização das cafrinas. O valor energético do sorgo para as diferentes classes de animais podem ser vistas no Capítulo 1.

Do ponto de vista nutricional, o sorgo granífero apresenta-se semelhante ao milho, porém inferior em concentração de óleo, energia e alguns aminoácidos. Esta semelhança nutricional do milho dependerá da variedade de sorgo granífero e da presença ou não de tanino, estimando-se valores nutricionais aproximadamente de 85 e 99% em relação ao milho,

respectivamente (Rostagno et al., 2017). O sorgo apresenta níveis de alguns aminoácidos inferiores ao milho, é pobre em pigmentantes, possui baixos níveis de ácido linoleico (Antunes et al., 2007; Fernandes et al., 2014), possuindo ainda propriedades que podem comprometer a digestibilidade do amido, pois a matriz proteica (cafirina) existente no endosperma forma um tecido de suporte dos grânulos, dificultando penetração de água e enzimas ao longo do endosperma, reduzindo a digestibilidade do amido (Fernandes et al., 2014; Rooney; Pflugfelder, 1986). Por outro lado, o sorgo contém mais aminoácidos essenciais (treonina, triptofano e valina) do que o milho.

A proteína do sorgo tem uma composição média de 54,7% de cafirina, 30,8% de glutelina, 7,5% de albumina e 7,0% de globulina (Virupaksha; Sastry, 1968; Ali, et al., 2009; Wong et al., 2009), sendo que a concentração e a composição da cafirina são importantes determinantes da digestibilidade dos aminoácidos essenciais no grão. Constitui uma região densa, rica em aminoácido sulfurado (cisteína), resistente à penetração de água e enzimas, retardando a degradação física e enzimática do amido e da proteína (Fernandes et al, 2014; Fialho et al., 2002; Marques et al., 2007).

O melhoramento de sorgo deve ser direcionado para reduzir a concentração de cafirina e aumentar a de glutelina, para melhorar a digestibilidade e melhorar o valor nutritivo do sorgo. Selle et al. (2020) constataram que as concentrações de cafirina nas lavouras de sorgo australianas podem ter aumentado nas últimas duas décadas, o que pode estar tendo impacto negativo no desempenho de frangos de corte com dietas à base de sorgo. Sorgo com baixo teor de proteínas conterá automaticamente menos cafirina, mas sua incorporação nas dietas de suínos e aves exigirá maiores inclusões de farelo de soja e aminoácidos sintéticos para atender às metas de aminoácidos digestíveis nas dietas formuladas. No entanto, pode ser possível selecionar sorgos com menores proporções de cafirina de proteína total, sem reduções no conteúdo de proteína absoluta do grão para ração.

A digestibilidade da proteína do sorgo é influenciada por alguns fatores exógenos que podem ser polifenóis no pericarpo, fitato no pericarpo e germe, polissacarídeos não amiláceos no pericarpo e nas células da parede do endosperma e amido no endosperma (Duodu et al., 2003).

As correlações entre rendimento de grãos e a concentração e digestibilidade da proteína é baixa. Por outro lado, a correlação entre a digestibilidade de proteínas e maturidade tardia é alta, o que não é desejável (Bramel-Cox et al., 1990). Em vista da relação indesejável entre o

rendimento e a digestibilidade da proteína, os autores sugerem um ranking de classificação dos materiais [(rendimento + digestibilidade) – dias para florescimento], com seleção de 50% das famílias superiores para rendimento e digestibilidade da proteína, de forma a aumentar estas duas características sem mudar muito o ciclo da cultura. A herdabilidade para esse índice gerado foi de 38%, o que é moderado e indica que mais melhorias podem ser feitas, mas exigindo tempo e paciência.

Beta et al. (2001) encontraram baixa correlação entre as propriedades do amido do sorgo (gelatinização, viscosidade, amilose), e as características físicas da qualidade do grão (peso e tamanho de grãos), sugerindo que a seleção de genótipos de sorgo deve ser realizada para características específicas e não simultaneamente.

Tanino

A grande maioria de sorgo granífero plantado no Brasil não possui tanino nos grãos. Somente no Rio Grande do Sul, o equivalente a menos de 1% dos cultivos nacionais, são plantadas cultivares de sorgo com tanino, por causa do período de colheita com chuva e problemas de ataques de pássaros.

O sorgo com tanino diminui a eficiência alimentar entre 5% e 20% quando usado como alimento para animais monogástricos. Para bovinos, o tanino não é problema. Para alimentação humana, o sorgo com tanino, por ter alta atividade antioxidante, pode ser usado como nutracêutico. Como o sorgo no Brasil é usado quase que exclusivamente para alimentação animal, é interessante que as empresas lancem somente híbridos sem tanino. A determinação da presença dos taninos no grão de sorgo apresenta vários problemas, uma vez que os métodos colorimétricos geralmente não diferenciam taninos de outros compostos fenólicos. Outra dificuldade é a obtenção de substâncias adequadas para serem utilizadas como padrão para esses métodos. Os métodos mais utilizados para estimar o teor de tanino em sorgo são Azul da Prússia, Vanilina/HCl e Proantocianidina. A presença do tanino no grão de sorgo depende da constituição genética do material. Caso os genótipos possuam os genes dominantes ($B_1_B_2$), este sorgo é considerado com presença de tanino. No passado, era comum encontrar classificação de sorgo dos grupos I, II e III, representando teores baixos, médios e altos de tanino. Hoje, sabe-se que o tanino está presente ou ausente no grão. A pesquisa tem mostrado que percentuais abaixo de 0,70% no grão, verificados em algumas análises laboratoriais, são devidos a outros fenóis

e não ao tanino condensado, e que, portanto, não são prejudiciais à dieta alimentar dos animais (Magalhães; Durães, 2003).

O tanino deixa a testa do grão com cor marrom/arroxeadada. Em razão disso, muitas vezes acha-se que todo o pericarpo do grão é marrom também. No entanto, a cor do pericarpo e a intensidade da cor não refletem necessariamente a presença de taninos no sorgo.

O sorgo com pericarpo de cor escura pode não conter taninos condensados, mas o sorgo com testa pigmentada deve ter os taninos; a presença de taninos condensados depende da presença de testa pigmentada (Dykes et al., 2011).

A cor do grão de sorgo também é influenciada, em menor grau, pelos genes de espessura do pericarpo (Z), intensificador (I), cor da testa (Tp) e espalhador (S). O gene Z dominante (Z_) produz um pericarpo fino, enquanto o gene Z recessivo (zz) produz um pericarpo espesso que é preenchido com grânulos de amido no mesocarpo, sendo que, quanto mais espesso o pericarpo, mais escura é a cor (Rooney; Waniska, 2000).

O gene intensificador (I) influencia a intensidade da cor apenas nos grãos com pericarpo vermelho e amarelo, e o gene dominante I (I_) aumenta a intensidade da cor, enquanto o gene recessivo I (ii) resulta em cores mais claras (Earp et al., 2004; Rooney; Waniska, 2000). O gene da cor da testa (Tp) controla a cor do pigmento na testa, e a cor da testa é marrom quando o alelo Tp é dominante (Tp_) e roxa quando é recessivo (tptp) (Dykes; Rooney, 2006). O gene espalhador (S) controla a propagação de pigmentos apenas em genótipos de sorgo contendo testa pigmentada (B₁_B₂_).

Por sua vez, o gene S dominante (S_) faz com que os pigmentos se espalhem da testa para o pericarpo (Rooney; Waniska, 2000). Sorgo com formas dominantes de testa pigmentada e genes espalhadores (B₁_B₂_S_) têm o maior conteúdo de tanino condensado, e esses sorgo são altamente resistentes ao ataque de fungos e pássaros (Dykes; Rooney, 2006; Rooney; Waniska, 2000).

Considerações Finais

O sorgo granífero é uma cultura de grande potencial para plantio na segunda safra, estando entre as alternativas mais promissoras quando se aborda o tema de mudanças climáticas. Portanto, existe possibilidade de a área de plantio de sorgo continuar crescendo nos próximos anos, e pesquisas de melhoramento são essências para suportar esse crescimento.

Apesar de haver poucas empresas de melhoramento de sorgo no Brasil, os híbridos disponíveis no mercado possuem excelentes tetos produtivos. A união destas empresas, similar ao que ocorreu décadas atrás com a criação do Grupo Pró-Sorgo, é primordial para que a cultura do sorgo continue crescendo.

O melhoramento de sorgo granífero deve levar em consideração uma grande quantidade de variáveis a serem trabalhadas, com destaque para tolerância à seca, resistêndia a doenças, como antracnose, míldio e helmintosporiose, e resistêndia a insetos-pragas, como pulgão e lagarta-do-cartucho.

Características de qualidade do grão ainda são pouco trabalhadas, mas deverão ser pensadas para o futuro, por exemplo, redução da quantidade de cafrinas dos grãos para melhorar a digestibilidade na alimentação de monogástricos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Embrapa Milho e Sorgo pelo suporte na realização da pesquisa.

Referências

ACOMPANHAMENTO da Safra Brasileira [de] Grãos: safra 2018/19: nono levantamento. Brasília, DF: Conab, 2019. 113 p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

ALI, N. M. M.; EL TINAY, A. H.; ELKHALIFA, A. E. O.; SALIH, O. A.; YOUSIF, N. E. Effect of alkaline pretreatment and cooking on protein fractions of a high-tannin sorghum cultivar. **Food Chemistry**, v. 114, n. 2, p. 646-648, 2009.

ANTUNES, R. C.; RODRIGUEZ, N. M.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; BORGES, I.; BORGES, A. L. C. C.; SALIBA, E. O. S. Composição bromatológica e parâmetros físicos de grãos de sorgo com diferentes texturas de endospermas. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 59, n. 5, p. 1351-1354, 2007.

ARUMUGANATHAN, K.; EARLE, E. D. Nuclear DNA content of some important species. **Plant Molecular Biology Report**, v. 9, p. 208-218, 1991.

BATISTA, P. S. C.; FERNANDES, J. S. C.; PORTUGAL, A. F.; CANGUSSÚ, L. V. de S.; JULIO, M. P. M.; MENEZES, C. B. de. Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 379-395, 2019.

BETA, T.; OBILANA, A. B.; CORKE, H. Genetic diversity in properties of starch from Zimbabwean sorghum landraces. **Cereal Chemistry**, v. 78, n. 5, p. 583-589, 2001.

BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. (ed.). **Physiology and biotechnology integration for plant breeding**. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 141-223.

BOYLES, R. E.; COOPER, E. A.; MYERS, M. T.; BRENTON, Z.; RAUH, B. L.; MORRIS, G. P.; KRESOVICH, S. Genome-wide association studies of grain yield components in diverse sorghum germplasm. **Plant Genome**, v. 9, n. 2, p. 1-17, 2016.

BRAMEL-COX, P. J.; LAUVER, M. A.; WITT, M. E. Potential gain from selection in grain sorghum for higher protein digestibility. **Crop Science**, v. 30, n. 3, p. 521-524, 1990.

CANIATO, F. F.; HAMBLIN, M. T.; GUIMARÃES, C. T.; ZHANG, Z.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHÃES, J. V. Association mapping provides insights into the origin and the fine structure of the sorghum aluminum tolerance locus, AltSB. **Plos One**, v. 9, n. 1, e87438, 2014.

CLAYTON, W. D. Proposal to conserve the generic name *Sorghum* Moench (Gramineae) versus *Sorghum* Adans (Gramineae). **Taxon**, v. 10, p. 242-243, 1961.

COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. **Seja o doutor do seu sorgo**. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 24 p. (Arquivo do Agrônomo, 14). Encarte do Informações Agronômicas, n.100.

DE WET, J. M. Systematics and evolution of sorghum Sect. Sorghum (Graminae). **American Journal of Botany**, v. 65, n. 4, p. 477-484, 1978.

DOGGETT, H. **Sorghum**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

DUODU, K. G.; TAYLOR, J. R. N.; BELTON, P. S.; HAMAKER, B. R. Factors affecting sorghum protein digestibility. **Journal of Cereal Science**, v. 38, n. 2, p. 117-131, 2003.

DYKES, L.; PETERSON, G. C.; ROONEY, W. L.; ROONEY, L. W. Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. **Food Chemistry**, v. 128, n. 1, p. 173-179, 2011.

DYKES, L.; ROONEY, L. W. Sorghum and millet phenols and antioxidants. **Journal of Cereal Science**, v. 44, n. 3, p. 236-251, 2006.

EARP, C. F.; MCDONOUGH, C. M.; ROONEY, L. W. Microscopy of pericarp development in the caryopsis of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 1, p. 21-27, 2004.

EJETA, G.; GRENIER, C. Sorghum and its weedy hybrids. In: GRESSEL, J. (Ed.). **Crop ferality and volunteerism**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 123-135.

FERNANDES, E. A.; LITZ, F. H.; CARVALHO, C. M. C.; SILVEIRA, M. M.; SILVA, M. C. A. Perspectivas da demanda de grãos de sorgo para alimentação animal. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 1-14.

FIALHO, E. T.; LIMA, J. A. F.; OLIVEIRA, V.; SILVA, H. O. Substituição do milho pelo sorgo sem tanino em rações de leitões: digestibilidade dos nutrientes e desempenho animal. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, n. 1, p. 105-111, 2002.

KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 1-14.

FRACASSO, A.; TRINDADE, L. M.; AMADUCCI, S. Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE. **BMC Plant Biology**, v. 16, article 115, 2016.

HOUSE, L. R. **A guide to sorghum breeding**. 2. ed. Patancheru: ICRISAT, 1985.

GOUD, J. V.; VASUDEVA-RAO, M. Inheritance of height in sorghum. **Genética Agrária**, v. 31, p. 39-51, 1977.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; LIU, J.; MAGALHÃES, J. V. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 66, p. 571-598, 2015.

LUDLOW, M. M. Physiological mechanisms of drought resistance. In: SYMPOSIUM ON APPLICATION AND PROSPECTS OF BIOTECHNOLOGY, 1992, Lubbock, Texas. **Proceedings...** Austin: University of Texas, 1993. p. 11-34.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Tanino no grão de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 88).

MAGALHÃES, J. V. de; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. de P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.-H.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PINEROS, M. A.; SHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.; TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, v. 39, n. 9, p. 1156-1161, 2007.

MARQUES, B. M. F. P. P.; ROSA, G. B.; HAUSCHILD, L.; CARVALHO, A. D. A.; LOVATTO, P. A. Substituição de milho por sorgo baixo tanino em dietas para suínos: digestibilidade e metabolismo. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 59, n. 3, p. 767-772, 2007.

MAUNDER, A. B. Objectives and approaches to grain and forage sorghum improvement in the Americas. In: RAO, N. G. P.; HOUSE, L. R. (ed.). **Sorghum in seventies**. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1972.

MELO, J. O.; LANA, U. G. de P.; PIÑEROS, M. A.; ALVES, V. M. C.; GUIMARÃES, C. T.; LIU, J.; ZHENG, Y.; ZHONG, S.; FEI, Z.; MARON, L. G.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHÃES, J. V. de. Incomplete transfer of accessory loci influencing SbMATE expression underlies genetic background effects for aluminum tolerance in sorghum. **The Plant Journal**, v. 73, n. 2, p. 276-288, 2013.

MELO, J. O.; MARTINS, L. G. C.; BARROS, B. A.; PIMENTA, M. R.; LANA, U. G. P.; DUARTE, C. E. M.; PASTINA, M. M.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; FONTES, E. P. B.; MAGALHÃES, J. V. Repeat variants for the SbMATE transporter protect sorghum roots from aluminum toxicity by transcriptional interplay in cis and trans. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 116, n. 1, p. 313-318, 2019.

MENEZES, C. B. de; CARVALHO JÚNIOR, G. A. de; SILVA, L. A.; BERNARDINO, K. C.; SOUZA, V. F.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Combining ability of grain sorghum lines selected for aluminum tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 42-48, 2014.

MENEZES, C. B. de; COELHO, A. M.; SILVA, A. F. da; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; RODRIGUES, J. A. S. É possível aumentar a produtividade de sorgo granífero no Brasil? In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 32., 2018, Lavras. **Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil**: livro de palestras. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2018. p. 106-139.

MENEZES, C. B. de. A opção interessante do sorgo. **A Granja**, v. 76, n. 856, p. 35-36, abr. 2020.

MINDAYE, T. T.; MACE, E. S.; GODWIN, I. D.; JORDAN, D. R. Heterosis in locally adapted sorghum genotypes and potential of hybrids for increased productivity in contrasting environments in Ethiopia. **The Crop Journal**, v. 4, n. 6, p. 479-489, 2016.

NGUYEN, H. T.; BABU, R. C.; BLUM, A. Breeding for drought resistance in rice: physiology and molecular genetics considerations. **Crop Science**, v. 37, n. 5, p. 1426-1434, 1997.

PATERSON, A. H.; BOWERS, J. E.; BRUGGMANN, R.; DUBCHAK, I.; GRIMWOOD, J.; GUNDLACH, H.; HABERER, G.; HELLSTEN, U.; MITROS, T.; POLIAKOV, A.; SCHMUTZ, J.; SPANNAGL, M.; TANG, H.; WANG, X.; WICKER, T.; BHARTI, A. K.; CHAPMAN, J.; FELTUS, F. A.; GOWIK, U.; GRIGORIEV, I. V.; LYONS, E.; MAHER, C. A.; MARTIS, M.; NARECHANIA, A.; OTILLAR, R. P.; PENNING, B. W.; SALAMOV, A. A.; WANG, Y.; ZHANG, L.; CARPITA, N. C.; FREELING, M.; GINGLE, A. R.; HASH, C. T.; KELLER, B.; KLEIN, P.; KRESOVICH, S.; MCCANN, M. C.; MING, R.; PETERSON, D. G.; MEHBOOB UR, R.; WARE, D.; WESTHOFF, P.; MAYER, K. F.; MESSING, J.; ROKHSAR, D. S. The *Sorghum bicolor* genome and the diversification of grasses. **Nature**, v. 457, n. 7229, p. 551-556, 2009.

RAO, N. G. P. Sorghum breeding in India: recent developments. In: RAO, N. G. P.; HOUSE, L. R. (ed.). **Sorghum in seventies**. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1972. p. 101-147.

ROONEY, W. L. Sorghum improvement- integrating traditional and new technology to produce improved genotypes. **Advances in Agronomy**, v. 83, p. 37-109, 2004.

ROONEY, L. W.; PFLUGFELDER, R. L. Factors affecting digestibility with special emphasis on sorghum and corn. **Journal of Animal Science**, v. 63, n. 5, p. 1607-1623, 1986.

ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Sorghum food and industrial utilization. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. (Ed.). **Sorghum: origin, history, technology, and production**. New York: John Wiley & Sons, 2000. v. 2, p. 689-729.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T.; HANNAS, M. I.; DONZELE, J. L.; SAKOMURA, N. K.; PERAZZO, F. G.; SARAIVA, A.; TEIXEIRA, M. L.; RODRIGUES, P. B.; OLIVEIRA, R. F.; BARRETO, S. L. T.; BRITO, C. O. **Tabelas brasileiras para aves e suínos**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2017. 252 p.

SANTOS, C. V. **Heterose e depressão endogâmica em híbridos de sorgo granífero**. 2020. 52 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 605-658.

SELLE, P. H.; MCINERNEY, B. V.; MCQUADE, L. R.; KHODDAMI, A.; CRYSTAL, P. V.; HUGHES, R. J.; LIU, S. Y. Composition and characterization of kafirin, the dominant protein fraction in grain sorghum. **Animal Production Science**, v. 60, n. 9, p. 1163-1172, 2020.

SILVA, A. R.; MALAVOLTA, E. A conquista do cerrado. In: PATERNIANI, E. (Org.). **Agricultura brasileira e pesquisa agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2000. p. 31-44.

SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum**: origin, history, technology, and production. New York: John Wiley & Sons, 2000. 824 p.

VIRUPAKSHA, T. K.; SASTRY, L. V. S. Studies on the protein content and amino acid composition of some varieties of grain sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 16, n. 2, p. 199- 203, 1968.

WONG, J. H.; LAU, T.; CAI, N.; SINGH, J.; PEDERSEN, J. F.; VENSEL, W. H.; HURKMAN, W. J.; WILSON, J. D.; LEMAUX, P. G.; BUCHANAN, B. B. Digestibility of protein and starch from sorghum (*Sorghum bicolor*) is linked to biochemical and structural features of grain endosperm. **Journal of Cereal Science**, v. 49, n. 1, p. 73-82, 2009.

Literatura Recomendada

BORRELL, A. K.; MULLET, J. E.; GEORGE-JAEGGLI, B.; VAN OOSTEROM, E. J.; HAMMER, G. L.; KLEIN, P. E.; JORDAN, D. R. Drought adaptation of stay-green sorghum is associated with canopy development, leaf anatomy, root growth, and water uptake. **Journal and Experimental Botany**, v. 65, n. 21, p. 6251-6263, 2014a.

BORRELL, A. K.; OOSTEROM, E. J.; MULLET, J. E.; GEORGE-JAEGGLI, B.; JORDAN, D. R.; KLEIN, P. E.; HAMMER, G. L. Stay-green alleles individually enhance grain yield in sorghum under drought by modifying canopy development and water uptake patterns. **New Phytologist**, v. 203, n. 3, p. 817-830, 2014b.

RAKSHIT, S.; BELLUNDAGI, A. Conventional breeding techniques in sorghum. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. **Breeding sorghum for diverse end uses**. Cambridge: Elsevier, 2019. p. 77-91.

Capítulo 9

Melhoramento genético de sorgo forrageiro

*José Avelino Santos Rodrigues
Bruno Henrique Mingote Julio
Cícero Beserra de Menezes*



Fotos: José A. S. Rodrigues

Introdução

O sorgo se destaca como planta forrageira por sua ampla adaptação, podendo ser cultivado em todo o território nacional, e por sua alta produtividade de massa seca aliada à alta qualidade nutricional da forragem. Por essas características, o sorgo vem ganhando, cada vez mais, espaço na utilização para silagem em razão da sua grande adaptabilidade quando comparada a outras culturas, em especial a do milho, que é a principal cultura utilizada para produção de silagem no Brasil.

Outro ponto a se destacar no sorgo é o melhoramento realizado pelas empresas que se dedicam a ele. Antigamente quando se buscava um híbrido para silagem se analisava o material que possuía maior produção de massa seca ou simplesmente o que possuía maior produção de massa verde. Hoje,

com o avanço da tecnologia de avaliação e maior conhecimento da parte nutricional, é sabido que nem sempre o híbrido com maior produção de massa seca é o material que terá maior rendimento animal em carne e leite.

A prática de conservação de forragens sob a forma de silagem é uma das mais difundidas e crescentes no Brasil. À medida que a exploração pecuária se torna mais tecnificada, a procura de melhores índices zootécnicos e de rentabilidade econômica têm induzido os produtores de leite e de corte a adotarem sistematicamente essa prática.

Estima-se que o sorgo forrageiro ocupa aproximadamente 400 mil hectares de área plantada para ensilagem no Brasil, mas tem crescido muito nos últimos anos, assim como o número de híbridos e variedades adaptados para produção de silagem de qualidade, comercializados no mercado nacional. Estima-se ainda que o plantio de milho para silagem ocupa 1,2 a 1,4 milhão de hectares e que 80.000 a 100.000 hectares sejam ocupados por outras culturas (cana, capim-napier, palhada de trigo, etc.). O sorgo é uma cultura que produz silagens com boas características fermentativas, variando em torno de 90% a 95% do valor nutritivo do milho quando fornecido como único volumoso, ou 85% a 90% quando ingrediente de uma dieta (Neumann et al., 2002; Gonçalves et al., 2005; Amin; Mello et al., 2009).

Trajatória do Sorgo Forrageiro no Brasil

A planta de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), moderna, é um produto da intervenção do homem, e este vem transformando-a para vários objetivos. Sorgo é uma extraordinária fábrica de proteína, energia e de massa, e é muito utilizado em regiões onde não se obtêm boas produtividades de grãos ou de forragem cultivando-se outras espécies, como o milho.

A origem do sorgo está provavelmente na África, embora algumas evidências indiquem que possa ter havido duas regiões de dispersão independentes, continente africano e Índia. A domesticação do sorgo deve ter acontecido por volta de 3.000 a. C., ao mesmo tempo em que a prática de domesticação e cultivo de outros cereais era introduzida no Egito antigo a partir da Etiópia (Doggett, 1988).

Quando e como o sorgo se dispersou para fora da África é muito estudado. O Sorgo Durra, nome de um dos tipos raciais da espécie, é encontrado extensivamente desde a Etiópia, passando pelo Vale do Nilo até o Oriente próximo, atingindo a Índia e a Tailândia. Os Durras provavelmente foram introduzidos no mundo árabe por volta de 1000 a 800 a. C. O sorgo

chegou à Europa através da Itália, provavelmente com sementes trazidas da Índia por volta de 60 a 70 anos d. C. Partindo também da Índia, o sorgo chegou à China no século III d. C. Os mesmos sorgos do tipo Durra já eram observados, nesta época, na Coreia e nas Províncias Chinesas próximas, provavelmente introduzidos através das chamadas “rotas da seda” que partiam da Ásia Menor em direção ao extremo Oriente (Deu; Hamon, 1994).

A partir de 1874, numerosos materiais genéticos foram introduzidos nos Estados Unidos pelo Departamento de Agricultura e outras instituições, provenientes de diversas partes do globo. Os Durras chegaram do Egito, os Shallu, da Índia, os Kafirs, da África do Sul, e os Milo, os Feterita e os Hegari, do Sudão. Já na primeira década do século XX, o sorgo foi extensivamente cultivado nos Estados Unidos da América para produção de xarope ou melaço (França et al., 2017). As cultivares eram de porte muito alto e tardias, com alguma semelhança fenotípica com os atuais sorgos forrageiros para silagem. O porte avantajado dessas cultivares não permitia sua utilização como plantas graníferas porque a colheita, mesmo que fosse por processo manual, era muito difícil.

A partir da década de 40, com o surgimento dos “combine types” ou sorgos graníferos, a cultura tomou um significativo incremento em várias regiões do Oeste dos Estados Unidos. Os maiores progressos, por causa do trabalho de um grupo de pesquisadores liderados por J.R. Quinby e J.C. Stephens, viabilizaram os híbridos a partir de 1960. O sorgo híbrido tornou-se um sucesso nos Estados Unidos, e a nova tecnologia rompeu suas fronteiras, tornando-se rapidamente uma cultura muito popular em vários países (Quinby, 1974).

O sorgo deve ter chegado ao Brasil da mesma forma como chegou às Américas do Norte e Central: através dos africanos escravizados. Nomes como “Milho d’Angola” ou “Milho da Guiné”, encontrados na literatura e no vocabulário da população do semiárido brasileiro até hoje, indicam que possivelmente as primeiras sementes de sorgo trazidas ao Brasil entraram pelo Nordeste.

A partir da segunda década do século XX até fins dos anos 60, a cultura foi reintroduzida de forma ordenada no País por institutos de pesquisa públicos e universidades. Deste período vamos encontrar registros de pesquisas com sorgo no Instituto Agrônomo de Campinas, no Instituto Agrônomo de Pernambuco, no Instituto de Pesquisas Agropecuárias do Rio Grande do Sul e em algumas Escolas de Agronomia, como a Esalq de

Piracicaba, Escola Superior de Agricultura de Lavras, Escola Superior de Agronomia de Viçosa, Escola de Agronomia de Pernambuco, Universidade Federal do Ceará, principalmente (Lira; Faris, 1979).

Coleções foram introduzidas da África e dos Estados Unidos e deram origem a cultivares forrageiras comerciais cujos nomes até hoje são lembrados pelos produtores, como as variedades Lavrense, Atlas, Sart e Santa Elisa, sendo esta última ainda hoje, recomendada pelo IAC.

No estado de São Paulo, a cultura do sorgo para alimentação animal recebeu grande impulso a partir da década de 1940, no Instituto Agrônomo de Campinas, com a execução do “Plano de Fazendas Piloto para melhoria da produção leiteira”, pelo Departamento de Produção Animal da Secretaria da Agricultura, quando lançou e foram distribuídas gratuitamente sementes da variedade Santa Elisa, cultivar de ciclo longo (160 a 170 dias), grande produtividade, colmo suculento e baixa produção de grãos. É provável que exista maior semelhança desta variedade com as diferentes cultivares de capim-elefante do que com o próprio milho, além da presença da durrina verificada nos estádios iniciais de crescimento. Essa substância encontra no rúmem condições favoráveis para se transformar em (HCN – ácido cianídrico). Portanto, se o sorgo for fornecido de forma inadequada, pode provocar reações negativas no animal, podendo chegar até à intoxicação. Sendo assim, essa cultura ainda se mantém à margem dos sistemas produtivos em termos de difusão e popularidade entre os pecuaristas.

As pesquisas com sorgo no Nordeste começaram em 1957, comparando-o com milho em quatro locais em Pernambuco. Na Bahia, começaram em 1963; no Ceará, em 1964; em 1966, em Alagoas; e em 1968, no Rio Grande do Norte, conforme relatos de Lira e Faris (1979).

O sistema de produção e distribuição de sementes melhoradas, no entanto, só viria a se desenvolver mais tarde, no começo dos anos 70, quando foi criada a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especificamente o Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, em Sete Lagoas-MG (atual Embrapa Milho e Sorgo) e quando o setor privado entrou no agronegócio do sorgo. E foi nesse momento que os híbridos de sorgo granífero, de porte baixo, e de sorgo forrageiros, adaptados para produzir silagem de alta qualidade chegaram ao Brasil através da fronteira gaúcha com os países platinos, e as empresas disponibilizaram híbridos adaptados às condições brasileiras.

A cultura do sorgo estabeleceu-se no Brasil, inicialmente, com base

em informações provenientes de resultados obtidos de programas de pesquisa desenvolvidos externamente ao País e, posteriormente, adaptados às nossas condições. A introdução de híbridos contribuiu de maneira significativa para sua expansão, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, porém sem perspectivas significativas de elevação do potencial de produção.

A oferta de sementes de sorgo no Brasil era incipiente antes da década de 1980. Porém, as ações de pesquisa com a cultura, principalmente para o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições do Brasil, se iniciaram em 1972, no extinto Ipeaco/DNPEA. Essas ações procuraram, também, identificar as limitações à produção, à utilização e à comercialização de grãos de sorgo, com a colaboração estreita entre os setores público e privado, especialmente a indústria de sementes.

Na década de 80 houve um redirecionamento das estratégias de pesquisa com a cultura, tendo em vista a mudança da fronteira agrícola. Essa fase contou com importantes parcerias, principalmente o INTSORMIL-USA. Em julho de 1979, foi criado o “Internacional Sorghum/Millet Program - INTSORMIL”, com a participação cooperativa em atividades de pesquisa de oito universidades americanas (University of Arizona, Florida A & ~ University, Kansas State University, University of Kentucky, Mississippi State University, University of Nebraska, Purdue University e Texas A & M University), Centros Internacionais de Pesquisa (CIAT, CIMMYT, ICRISAT e IRRI) e outras organizações (SAFGRAD e FAO) com os objetivos de estabelecerem-se elos entre instituições com interesses comuns na pesquisa de sorgo e milheto e implementarem-se colaboração e troca de informações entre instituições de pesquisa, visando melhorar a nutrição humana através da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias.

Em agosto de 1983, a Embrapa, através de sua presidência, estabeleceu com o INTSORMIL, um memorando de entendimento para cooperação sobre as atividades de pesquisa de mútuo interesse em sorgo e milheto, ficando estabelecido que o então Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo seria o coordenador técnico para este programa e responsável pela aprovação de planos de trabalhos para o Brasil.

Houve também o envolvimento de universidades americanas e institutos internacionais, que possibilitaram grande avanço no programa nacional, juntamente com o programa de desenvolvimento de cultivares da Embrapa e empresas privadas produtoras de sementes que no Brasil se estabeleceram.

A criação do Grupo Pro-Sorgo na década de 1990 (constituído de representantes da indústria de sementes, da pesquisa agropecuária, de instituições públicas e outros, que teve como objetivo o fomento da produção de sorgo no Brasil, com maior divulgação das potencialidades da cultura), permitiu o estabelecimento de parcerias, possibilitou maior abrangência das ações e da transferência dos resultados obtidos nas diversas instituições envolvidas, com reflexos diretos no mercado brasileiro de sementes, com tendência por demanda de cultivares específicas ou direcionadas para condições agroecológicas específicas. Essa interação contribuiu significativamente para o incremento na produção de grãos e forragem e conseqüentemente na competitividade e geração de renda do agronegócio brasileiro.

As contribuições dos setores público e privado, no oferecimento de cultivares adaptadas às condições de plantio e de alto potencial de produção, possibilitaram incrementos significativos na produtividade média nacional, com reflexos no aumento da oferta de alimento (grãos e forragem), na competitividade e na geração de renda. A interação pesquisa e empresas privadas tem contribuído significativamente para o incremento da produção de grãos e forragem e conseqüentemente na competitividade e geração de renda do setor, sendo um exemplo de sucesso de parceria público x privada.

A área cultivada com sorgo deu um salto extraordinário a partir do início dos anos 90. Atualmente, o Centro-Oeste é a principal região de cultivo de sorgo granífero, enquanto Minas Gerais, Rio Grande do Sul, São Paulo e Goiás são os estados que lideram a área de sorgos forrageiros para produção de silagem.

Apenas como ênfase, o sorgo granífero é cultivado basicamente sob três sistemas de produção no Brasil: no Rio Grande do Sul planta-se sorgo na primavera e colhe-se no outono. No Brasil central a semeadura é feita em sucessão às culturas de verão, principalmente a soja. E no Nordeste, é plantado na estação das chuvas ou de “inverno”.

No segmento de sorgo forrageiro o sistema é de cultivo exclusivo de verão- outono, e a maior área plantada ainda é para confecção de silagem. O sorgo de pastejo tem o seu principal mercado no Sul do País, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. Nos últimos anos cresceu significativamente a área de sorgos para pastejo e/ou corte verde no Sudeste e Centro-Oeste, para formação de palha para plantio direto. As modernas cultivares graníferas, forrageiras e de pastejo têm se adaptado muito bem aos sistemas integrados

de agricultura e pecuária. O sorgo passa a assumir cada vez mais um papel estratégico para a consolidação de uma política de exportação de milho, quer sob a forma direta ou agregada em ovos, carnes e leite.

A potencialidade forrageira é ainda ponto forte desta cultura para a pecuária bovina. O segmento da bovinocultura pode se tornar em curto prazo um dos mais importantes clientes para forragem e grãos de sorgo, e se transformar no elo que falta para a consolidação da cultura do sorgo no País. O sistema de confinamento de bovinos de corte implantado no Brasil nas últimas décadas e a tecnificação e expansão da exploração leiteira mostram que a demanda por alimentos volumosos é muito grande e deveria ser suprida na maior parte do ano por alimentos conservados.

A cultura de sorgo pode oferecer grande contribuição para minimizar os problemas decorrentes da estacionalidade da produção de forragem, além disso, atualmente tem-se procurado desenvolver híbridos que tenham bom equilíbrio entre colmo, folhas e panículas para que se possa aliar uma boa produtividade de matéria seca e um bom valor nutritivo. Os grãos de sorgo são largamente consumidos em rações balanceadas para pequenos e grandes animais. A planta inteira é utilizada sob forma de silagem, principalmente.

O avanço da moderna agricultura no Cerrado e seus diversos sistemas de produção continuam ampliando as possibilidades para os diferentes tipos de sorgo. A soja, principal parceira no sistema de sucessão de culturas, avança para os estados do Norte e Nordeste, com o sorgo acompanhando tal avanço.

O sistema de plantio direto e a integração agricultura-pecuária ajustam-se especialmente à cultura do sorgo, por causa da sua excelente produção de massa e de grãos. A expansão da agroindústria de carnes aumenta também a busca por matérias-primas de menor custo para alimentação de aves, suínos e bovinos.

A pecuária de leite e de corte se profissionaliza cada vez mais, à medida que os mercados consumidores exigem mais qualidade e preço competitivo. O milho, principal componente na alimentação animal no País, tem alto peso nas nossas exportações, principalmente “embalado” sob a forma de carnes (aves, suínos e bovinos). O sorgo surge então como a principal alternativa ao milho na chamada “cesta básica” de ingredientes forrageiros.

Escolha da Cultivar de Sorgo para Silagem

No Brasil, as cultivares de sorgo denominadas forrageiras, com ciclos mais longos e alturas superiores a 2 m, vigorosas e com grande capacidade de produção de matéria verde, subdividem-se em:

- a) Forrageiras com alta produtividade de massa, porém baixa produção de grãos e baixo teor de açúcares solúveis, utilizados para conservação na forma de silagem. Possuem altura próxima ou geralmente superior a 3 metros e sua silagem, na maioria das vezes, é de baixa qualidade nutritiva, baixo teor de grãos e baixa digestibilidade.
- b) Forrageiras com baixa produção de grãos, alta porcentagem de açúcares solúveis e altura próxima a 3 metros, denominadas sacarinas, as quais apresentam colmos com níveis de sacarose entre 10% e 14% e açúcares redutores, o que possibilita a sua industrialização para a produção de álcool etílico. Os colmos fornecem um caldo rico em açúcares fermentescíveis e os grãos, pelo processo de sacarificação, podem transformar seu alto teor de amido em significativas quantidades de açúcares mais simples e passíveis de fermentação, constituindo-se interessante matéria-prima de entressafra para as usinas produtoras de álcool. Grande parte das cultivares são sensíveis ao fotoperíodo. Também podem ser utilizadas para confecção de silagem.
- c) Forrageiras especializadas para pastejo, corte ou fenação, denominadas de sorgo ou capim-sudão (*Sorghum sudanense* ou seus híbridos com o *Sorghum bicolor*). Com relação aos outros tipos, apresentam um colmo fino, alta taxa de perfilhamento e rebrota. A sua silagem é de baixa qualidade, uma vez que possui muita água no colmo e muito baixa porcentagem de grãos na forragem.
- d) Forrageiras com boa produção de grãos e altura variando entre 2,20 m e 3,0 m, denominadas de silageiras de alta qualidade por produzirem silagem de alto valor nutricional, por causa da grande porcentagem de grãos na forragem, alta digestibilidade de fibras, resistência ao acamamento e grande capacidade de rebrota, entre outras características. Na Figura 1 vemos uma lavoura exemplar para silagem.



Foto: José Avelino Santos Rodrigues

Figura 1. Lavoura de sorgo BRS 658. Embrapa Milho e Sorgo.

O Brasil está se tornando um dos principais fornecedores de carnes para os mercados internacionais, além do mercado interno, e a oferta alternativa de materiais forrageiros e das diferentes formas de forragem, de custo compatível com as demandas desses mercados, é um fator imprescindível para o desenvolvimento do agronegócio do País. Desta forma, o desenvolvimento de cultivares que apresentem características agronômicas superiores é de capital importância estratégica para o atendimento dessas demandas.

No mercado brasileiro, existem diversas cultivares forrageiras adaptadas para produção de silagem de alta qualidade (Tabela 1), desenvolvidas e comercializadas pelas várias instituições públicas e privadas existentes no País.

Tabela 1. Cultivares de sorgo forrageiro para silagem e corte/pastejo na safra 2019/2020.

Silagem	Empresa	Pastejo	Empresa
BRS 655	Embrapa	AGN 40P84	Agromen
BRS 658	Embrapa	ADV 2800	Advanta
BRS Ponta Negra	Embrapa	AG2501C	Agroceres
SS318	Pioneer	AG2501P	Agroceres
Volumax	Agroceres	B16J002F	Pioneer
AG2005E	Agroceres	BM 500	Biomatrix
Chopper	Nuseed	BM 515	Biomatrix
Dominator	Nuseed	BRS810	Embrapa
Maxisilo	Nuseed	Jumbo	Nussed
Qualysilo	Nuseed	SHS 605	Santa Helena
Nusil 426	Nuseed	SHS 615	Santa Helena
SHS 570	Santa Helena	Nugrass 800 BMR	Nuseed
Podium	Biomatrix	Nugrass 900 F	Nuseed
20XB01	Semeali	Nutribem	Nuseed
Topsilo	Semeali	Supremo	Nuseed
AGN 10S20	Agromen	SF 15	IPA/Embrapa
ADV 2499	Advanta	SUDAN 4202	IPA/Embrapa
BRS 716*	Embrapa		
Agri-002E*	Agricomseeds		

Adaptado de relatórios de levantamento da Associação Paulista de Produtores de Sementes e Mudas (APPS) e dos sites das empresas de sementes. * Sorgo biomassa.

Estas variedades se destacam por apresentarem várias das características a seguir:

- a) Alta produtividade de forragem
- b) Precocidade de florescimento
- c) Alto desempenho animal
- d) Resistência ao acamamento
- e) Alta capacidade de rebrota
- f) Alta proporção de grãos na forragem
- g) Tolerância aos estresses abióticos (Al, seca)

- h) Eficiência nutricional das plantas (N, P)
- i) Tolerância aos estresses bióticos
- j) Alta digestibilidade de fibras
- k) Alto padrão de fermentação da silagem
- l) Porte e arquitetura da planta
- m) Alta produtividade de sementes dos paternais
- n) Paternais com alta capacidade de restauração da fertilidade
- o) Preço de sementes competitivo

Qualidade de uma Boa Silagem

O sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench) destaca-se por ser um alimento de alto valor nutritivo, que apresenta alta concentração de carboidratos solúveis essenciais para adequada fermentação láctica, bem como altos rendimentos de matéria seca por unidade de área.

Com valor nutritivo próximo ao do milho (85% a 95%), o uso do sorgo (planta inteira) para ensilagem é favorecido por apresentar altos níveis de carboidratos solúveis, capacidade tamponante relativamente baixa, conteúdo de matéria seca acima de 20% e estrutura física que favorece a compactação durante o enchimento do silo. Na Tabela 2 se encontram alguns parâmetros que devem ser utilizados para auxílio na seleção de materiais para silagem de sorgo.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para classificação das silagens.

Parâmetros	Muito Boa	Boa	Média	Ruim
Matéria Seca ¹ (%)	35 – 30	30 – 25	25 – 20	< 20
pH ¹	< 3,8	3,8 – 4,2	4,2 – 4,6	> 4,6
N-NH ₃ ² (%NT)*	< 10	10 – 15	15 – 20	> 20
DIVMS ^{3**}	> 65	65 – 55	55 – 40	< 40
Ácido Láctico (mg%)	> 5	3 – 5	2 – 3	< 2,0
Ácido Acético ⁴ (mg%)	< 2	2 – 2,5	> 2,5	-
Ácido Butírico ⁴ (mg%)	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,4	> 0,4

¹ Paiva (1976); ² Agricultural, and Food Research Council (1987); ³ Borges (1995); ⁴ Nogueira (1995).

* Nitrogênio Amoniacal

** Digestibilidade “in vitro” da Matéria Seca

Os critérios para seleção de híbridos de sorgo para silagem têm sido principalmente altura da planta, produtividade, produção de grãos, resistência a doenças e pragas e tolerância à seca. Porém, a identificação de características agrônômicas relacionadas ao processo de fermentação adequado, que proporcionem baixas perdas de matéria seca e nutrientes durante a ensilagem e altas taxas de digestibilidade e consumo, é de grande importância na seleção de cultivares mais apropriadas para a ensilagem.

Um alimento de qualidade deve oferecer ao animal quantidades adequadas de energia e proteínas, e, no caso de ruminantes, ainda deve apresentar fibra de boa qualidade e com capacidade de manter a saúde do rúmen. De acordo com o National Research Council (1989), a porcentagem ideal de FDN dietética deve estar entre 25% e 35%. Os níveis de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose, hemiceluloses e lignina no sorgo podem limitar a qualidade final das silagens, já que estas não apresentam redução após o processo fermentativo, permanecendo como principais barreiras à atuação dos microrganismos presentes no silo. Para isso é interessante que se busquem valores ótimos de FDN (<55%) e FDA (<40%) para maximizar a produção animal. Na Tabela 3 são apresentados valores médios de composição química e pH de silagens de sorgo e milho.

Tabela 3. Composição química média e pH de silagens de sorgo e milho (dados expressos na matéria seca).

Parâmetros	Silagem de milho	Silagem de sorgo
MS total (%)	30 – 35	28 – 32
PB (%)	6 – 8	6 – 9
FDN (%)	45 – 60	50 – 60
FDA (%)	23 – 43	23 – 50
Celulose (%)	24 – 35	17 – 38
Hemicel. (%)	21 – 30	13 – 23
Lignina	3 – 5	5 – 11
PH	3,8 – 4,0	3,8 – 4,2
NDT (%)	65 – 75	55 – 65

Fonte: Adaptado de Zago (1991), Nussio (1991), Evangelista e Lima (2000), Andrade et al. (2001), Castro (2002), Freitas (2002), Nussio et al. (2002), Mello (2002), Valadares Filho et al. (2002) e Pires (2003).

A variação no estágio de maturação da planta interfere diretamente na qualidade e no valor nutritivo da planta e da silagem por causa das maiores ou menores participações das frações de colmo, folha e panícula na matéria seca total.

Com o avanço do estágio de maturação, ocorre aumento do teor de amido na planta de sorgo, decorrente da conversão de carboidratos solúveis, armazenados temporariamente no colmo, em amido, depositado no grão. A maior participação da panícula no total de MS da planta está relacionada com valores nutritivos mais elevados e melhores digestibilidades.

A redução do conteúdo de carboidratos solúveis no colmo também é acompanhada por aumento nos teores de FDN, FDA e lignina. A ensilagem do sorgo deverá ser realizada com os grãos no estágio leitoso a pastoso, para evitar redução na digestibilidade da matéria seca das frações fibrosas, evitar eliminação, pelos animais, de grãos nas fezes, acamamento, ataque de pássaros e favorecer maior rebrota. Machado (2019), em experimento com silagens dos híbridos de sorgo BRS 610, BR 700 e BRS 655, colhidas em três estágios de maturação (leitoso, pastoso e farináceo), constatou que o teor ideal de MS no momento do corte foi de 25% a 35%, para o híbrido BR 700, correspondendo ao estágio leitoso. Já o BRS 610 deve ser colhido entre o estágio pastoso e o farináceo, e o BRS 655, entre o leitoso e o pastoso.

Sabe-se que a proporção de grãos na planta de sorgo é determinante da qualidade das silagens porque neles se encontra a maior fração energética disponível da planta. A altura da planta pode estar correlacionada positivamente com a produção de matéria natural e matéria seca. Entretanto, geralmente se correlacionam também positivamente com porcentagem de colmo e com a porcentagem de acamamento, características indesejáveis para a produção eficiente de forragem. Além disso, a maior porcentagem de colmos em relação às folhas e panículas gera o comprometimento do valor nutricional da forragem (Zago, 2001).

Assim como as gramíneas tropicais, o sorgo está submetido aos efeitos do estágio de maturação na produtividade e no valor nutricional. De modo geral, com o avançar da idade da planta ocorre aumento na produção de matéria seca por área, porém observa-se redução no valor nutricional por causa do aumento das frações fibrosas do colmo e folhas. Dessa forma, o conhecimento das características agrônômicas da cultivar com que se trabalha e da composição química da planta em diferentes idades é essencial para que se estabeleça o melhor ponto de corte, que proporcione uma boa

produtividade por área, sem limitar o consumo e a produção animal.

A determinação dos teores das frações fibrosas é muito importante na caracterização do valor nutritivo das forragens. Tanto o teor de fibra em detergente ácido (FDA) quanto o de fibra em detergente neutro (FDN) podem ser negativamente correlacionados com a digestibilidade e com o consumo. Valores muito baixos de proteína bruta (PB) comprometem a fermentação ruminal e conseqüentemente o consumo e o desempenho dos animais.

Na Tabela 4 são apresentados alguns parâmetros comparativos de silagens de milho e sorgo. Pode-se notar que os híbridos de sorgo possuem características bem próximas às de milho, o que torna o sorgo silageiro uma cultura muito promissora.

Tabela 4. Matéria seca (MS), proteína bruta (PB), matéria mineral (MM), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (Hem - % da MS) e produção de massa seca (PMS) das cultivares de milho e sorgo.

Híbridos	MS ¹ (%)	PB ¹ (%)	MM ¹ (%)	FDN ² (%)	FDA ² (%)	Hem ² (%)	PMS ² (t ha ⁻¹)
AGN25A23*	32,0	9,1	4,3	52,9 BCD	31,9 CD	21,1 AB	13,4 BC
AG1051*	35,8	9,0	4,2	53,3 BCD	32,9 CD	20,4 AB	16,5 AB
GNZ2728*	35,4	9,0	4,0	51,0 BCDE	35,3 CD	15,7 B	16,2AB
Farroupilha 25*	34,1	8,8	4,5	47,8 DE	31,3 CD	16,5 AB	11,3 C
DAS519*	34,8	8,4	4,4	45,5 DE	28,7 D	16,8 AB	13,5 BC
A3663*	34,0	8,4	4,6	58,7 AB	36,0 CD	22,7 A	15,3 ABC
2C577*	36,1	7,8	4,5	44,0 E	28,4 D	15,6 B	12,4 BC
A9404**	33,5	9,0	4,2	50,0 CDE	33,9 CD	16,1 AB	14,3 ABC
BRS610**	33,5	9,0	5,3	57,8 ABC	38,2 BC	19,7 AB	15,4 ABC
1F305**	33,1	8,7	4,3	63,0 A	44,5 AB	18,5 AB	18,2 A
Volumax**	34,0	8,6	4,2	62,5 A	46,5 A	16,0 AB	14,6 ABC
CV (%)	6,7	13,5	12,3	7,1	10,0	17,9	14,0

¹ Não diferem entre si pelo teste de F.

² Médias na mesma coluna seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

*,** Milho e sorgo, respectivamente.

Fonte: Fernandes et al. (2009).

Através dos resultados acima se pode constatar que existem variações na produção de matéria seca e composição química, com conseqüente influência no desempenho animal, demonstrando a importância de avaliações

criteriosas e constantes do material genético disponível no mercado e de novas cultivares a serem lançadas.

Produtividade de Forragem

O armazenamento de forragem para uso no período seco, como exemplo, silagens de milho e sorgo, é fundamental nas atuais condições de mudanças climáticas e veranicos prolongados nas diversas regiões do Brasil. A silagem de boa qualidade diminui os custos de produção pela redução na utilização de concentrados, sem reduzir o desempenho animal.

Os híbridos atuais de sorgo silageiro, quando bem manejados, produzem de 50 a 70 t ha⁻¹ no primeiro corte, e 20 a 30 t ha⁻¹ no segundo corte, podendo o produtor ainda plantar “capim” consorciado com o sorgo para estabelecer sua pastagem (Rodrigues et al., 2015). Nas Tabelas 5 e 6 constam produções médias de três híbridos de sorgo silageiro. O estágio de colheita do sorgo silageiro, para obtenção de maiores rendimentos de matéria verde, pode variar entre os híbridos, mas de forma geral situa-se entre os estádios leitoso e pastoso (Araújo et al., 2007).

Tabela 5. Produção de matéria verde (PMV) em toneladas por hectare dos híbridos de sorgo BRS 610, BR 700 e BRS 655 em três estádios de maturação (leitoso, pastoso e farináceo).

Híbridos	Estádios de maturação		
	Leitoso	Pastoso	Farináceo
BRS 610	68,71Aa	56,99Ab	40,40Ac
BRS 700	47,40Ba	34,25Bb	31,10A
BRS 655	43,19Bb	54,13Aa	39,33Ab

Médias seguidas de letras distintas maiúsculas na coluna e minúsculas na linha diferem entre si ($P < 0,05$) pelo teste SNK; CV= 14,90%. Fonte: Machado (2009).

Na Tabela 4, podem-se observar híbridos de sorgo tão ou mais produtivos do que os de milho, isso sem considerar que o sorgo permite ainda um segundo corte da rebrota. Vale ressaltar que, se o solo apresentar condições favoráveis de nutrição e umidade, outros cortes sucessivos podem ser obtidos. Simplício et al. (2019) realizaram quatro cortes sucessivos sob irrigação em cultivares de sorgo e obtiveram um somatório de produtividades

entre 123 t ha⁻¹ e 211 t ha⁻¹ e entre 39 t ha⁻¹ e 69 t ha⁻¹ de matéria verde matéria seca total, respectivamente.

Ainda neste contexto, o híbrido de sorgo Volumax produziu 18,2 t ha⁻¹, produtividade está acima dos híbridos de milho. Dados de altas produtividades podem também ser observados na Tabela 6, com híbridos produzindo acima de 15 t ha⁻¹ de matéria seca.

Tabela 6. Produção de matéria natural (MN), de massa seca (MS) e porcentagem de matéria seca em quatro híbridos de sorgo.

Cultivares	MN (t ha ⁻¹)	MS (t ha ⁻¹)
BRS 610	63,90	14,22
CMSXS 762	59,93	15,4
BR 506	67,56	16,338
BR 700	45,87	14,69

Fonte: Oliveira et al. (2005).

A altura da planta de sorgo é controlada por quatro pares de genes principais (*dw1*, *dw2*, *dw3* e *dw4*), os quais atuam de maneira independente e aditiva sem afetar o número de folhas e a duração do período de crescimento. As plantas com os genes recessivos nos quatro loci resultam em porte mais baixo (60-80 cm), caracterizadas pelo nanismo, e são chamadas “anãs-4”; enquanto as plantas com genes recessivos em três loci e dominante no outro locus são chamadas “anãs-3”. Cultivares graníferas normalmente são “anãs-3” e cultivares forrageiras são “anãs-2” ou “anãs-1”, com genes recessivos em dois ou um loci respectivamente. A taxa de produção de matéria seca no sorgo é fortemente afetada pela área foliar no primeiro estágio de crescimento (germinação a iniciação da panícula). A área foliar final é determinada pelas taxas de produção e duração da expansão, pelo número de folhas produzidas e a taxa de senescência, os quais são fatores bastante afetados pelo ambiente.

Os últimos híbridos lançados pelas empresas de sementes são de cultivares com porte entre 2,5 m a 3 m. Estas cultivares são adaptadas ao plantio adensado, têm plantas com folhas mais eretas, boa produção de grãos e digestibilidade, e colmos mais grossos para evitar acamamento. A exceção é alguns poucos materiais na linha de sorgo biomassa, de porte acima de 4 m, mas com ciclo mais elevado e baixa produção de grãos. Estes últimos possuem maior produção de massa verde por hectare, devendo ser usados

como volumosos, e necessitam de alguns cuidados a mais na hora de ensilar, como adição de fubá ou aditivos, quando o corte da planta for feito com umidades elevadas.

A ensilagem de plantas forrageiras com elevado teor de umidade torna o ambiente favorável à proliferação de bactérias do gênero *Clostridium*, que promovem fermentação indesejável. Além de prejudicar a fermentação, a ensilagem de forragens com alto teor de umidade resulta na produção de elevadas quantidades de efluente. A adição de fubá de milho como aditivo em silagens eleva o teor de matéria seca, auxilia na fermentação, e ajuda na elevação dos valores nutricionais da silagem. No caso da adição de inoculantes bacterianos, eles aumentam o número de bactérias produtoras de ácido láctico, podendo acelerar a fermentação e resultar em silagens de melhor qualidade, diminuindo os teores de etanol e nitrogênio amoniacal (Pereira Neto et al., 2009).

Tolerância ao Alumínio

O crescimento das raízes de sorgo está relacionado com a temperatura do ar e é limitado pela falta de umidade no solo e disponibilidade de fotoassimilados oriundos das folhas. Um dos fatores mais importantes que afetam o uso de água e a tolerância à seca é um sistema radicular eficiente que o sorgo possui, podendo extrair água de camadas profundas do solo. Fazendo-se comparação entre raízes primárias de milho e sorgo encontra-se que ambas as culturas apresentam basicamente a mesma quantidade de massa radicular, porém as raízes secundárias do sorgo são no mínimo o dobro daquelas encontradas no milho. Além do mais o sistema radicular do sorgo é mais extenso, fibroso e com maior número de pelos absorventes (Magalhães et al., 2000).

A profundidade do sistema radicular pode chegar até 1,5 m (sendo 80% até 30 cm de profundidade no solo), em extensão lateral pode alcançar 2,0 m. O crescimento das raízes em geral termina antes do florescimento; nessa fase a planta passa a priorizar as partes reprodutivas (panículas), as quais apresentam grande demanda por fotoassimilados.

Em solos ácidos com alta saturação de alumínio tóxico, a formação do sistema radicular é reduzida, e ele apresenta diâmetro mais grosso. Plantas com genes para tolerância ao Al tóxico desenvolvem um sistema radicular mais profundo e mais eficiente na aquisição de água e nutrientes. Geralmente variedades de sorgo resistentes à seca têm mais biomassa radicular e maior

volume de raízes e também maior proporção raiz/caule que os materiais suscetíveis à seca.

Importância do Ciclo / Precocidade

O florescimento corresponde ao estágio EC3 (Estádio de crescimento 3) que engloba polinização, fertilização, desenvolvimento e maturação do grão. A diferenciação floral do sorgo é afetada principalmente pelo fotoperíodo e pela temperatura do ar. O período mais crítico para a planta, em que ela não pode sofrer qualquer tipo de estresse biótico ou abiótico vai da diferenciação da panícula à diferenciação das espiguetas (2 a 3 semanas de duração). Normalmente a diferenciação da gema floral inicia-se 30 a 40 dias após a germinação (pode variar de 19 a mais de 70 dias). Em climas quentes, o florescimento em geral ocorre com 55 a 70 dias após a germinação (pode variar de 30 a mais de 100 dias). Normalmente, a formação da gema floral ocorre 15 cm a 30 cm acima do nível do solo, esse fato ocorre quando as plantas têm cerca de 50 cm a 75 cm de altura.

O florescimento no sorgo forrageiro é influenciado pelo fotoperíodo, sendo a resposta do desenvolvimento da planta à duração dos períodos de luz e de escuro. Durante um ano, o comprimento dos dias e conseqüentemente a quantidade de horas de sol variam de acordo com a latitude e estação do ano. Para o sorgo, existem diferentes respostas à duração do período luminoso diário, sendo que os materiais genéticos podem ser classificados como sensíveis ou insensíveis ao fotoperiodismo.

O controle da sensibilidade ao fotoperiodismo e de maturação (indução de floração) no sorgo está associado ao efeito de dois alelos em seis loci: *Ma1, ma1*; *Ma2, ma2*; *Ma3, ma3*; *Ma4, ma4*; *Ma5, ma5*; e *Ma6, ma6*. Os loci *Ma1* a *MA4* controlam o ciclo, enquanto os loci *Ma5* e *Ma6* são responsáveis pela sensibilidade ao fotoperiodismo.

Quando a cultivar de sorgo é sensível, ela responde a dias curtos e floresce em períodos do ano com noites longas. Nessas cultivares, a gema apical permanece vegetativa até que os dias encurtem o bastante para haver a sua diferenciação em gema floral, ou seja, se o comprimento do dia aumenta, a planta não floresce, ao passo que se o comprimento do dia decresce, tornando-se menor que 12 horas e 20 minutos, ocorrerá a indução floral.

O atraso no plantio, ou o plantio de safrinha, também pode ocasionar antecipação dos estádios fisiológicos da planta, e conseqüentemente produzir plantas menores para um mesmo estágio de colheita baseado no grão. Maiores

alturas da planta de sorgo estão associadas aos efeitos do fotoperíodo não indutivo (dias maiores que 12,9 h) durante a fase vegetativa das cultivares.

Quando a semeadura é realizada em outubro-novembro, na região Sudeste, os dias ainda são longos, e, sem o estímulo ao florescimento, a planta tem mais tempo para formação de um maior número de nós, entrenós e primórdios foliares, o que resulta em aumento da produção de matéria verde e de matéria seca.

Por outro lado, as plantas semeadas em fevereiro, apesar de apresentarem menor estatura e, portanto, menores produções de matéria verde para um mesmo estágio de grão, possuem menor porcentagem de colmos na matéria seca e, proporcionalmente, mais folhas e panícula, o que implica uma melhor qualidade da forragem. Nos últimos anos, o cultivo de sorgo na segunda safra tem aumentado nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, portanto os programas de melhoramento deverão ficar atentos para seleção de híbridos de sorgo silageiro insensíveis ao fotoperíodo.

Tolerância à Seca

O sorgo requer menos água para se desenvolver quando comparado com outros cereais, sendo que o período mais crítico à falta de água é do florescimento até o enchimento dos grãos. Quando comparado com o milho, o sorgo produz mais sobre estresse hídrico (as raízes exploram melhor o perfil do solo, entre outros mecanismos de escape), murcha menos e é capaz de se recuperar de estiagens prolongadas.

Em geral, parece haver no sorgo uma correlação grande entre resistência ao calor e a falta de água. Também parece haver correlação entre resistência à seca e a teores de alumínio no solo. O déficit hídrico quando acontece no estágio EC1 provoca menos danos à planta do que no EC2. No estágio EC2 a escassez de água vai resultar na redução das taxas de crescimento da panícula e das folhas e no número de sementes por panícula. Esses efeitos são devidos, provavelmente, a uma redução na área foliar, resistência estomática aumentada, fotossíntese diminuída e a uma desorganização do estado hormonal da panícula em diferenciação. Quando a falta de água acontece no EC3, o resultado é a senescência rápida das folhas inferiores, com consequente redução no rendimento de grãos e massa (Magalhães et al., 2000).

Estima-se que o sorgo, para produzir grãos e forragem requer por volta de 25 mm de água após o plantio, 250 mm durante o crescimento e

25 mm a 50 mm durante a maturidade (Dogget, 1988).

A temperatura, o déficit de água e as deficiências pelos nutrientes afetam as taxas de expansão das folhas, a altura da planta e outros aspectos de desenvolvimento das plantas, sobretudo nos genótipos sensíveis ao fotoperíodo. Esses efeitos podem ser modificados por mudanças na duração do dia. A insuficiência de água é uma das causas mais comuns de redução de área foliar e está relacionada com a expansão das células. A temperatura noturna do ar baixa geralmente atrasa o desenvolvimento dos estádios EC 2 e EC 3. Se permanecer por longo período pode comprometer, significativamente, a produtividade.

Suscetibilidade a Baixa Temperatura

Em razão da sua origem tropical, o sorgo é uma das culturas tropicais mais sensíveis às baixas temperaturas noturnas. A temperatura ótima para crescimento está por volta de 33 °C a 34 °C, considerando umidade do solo adequada. Acima de 38 °C e abaixo de 16 °C, a produtividade decresce. Baixas temperaturas durante o desenvolvimento vegetativo (< 10 °C) causam redução na área foliar, no perfilhamento, na altura, na acumulação de matéria seca e atraso na data de florescimento. Isto é devido a uma redução da síntese de clorofila, especialmente nas folhas que se formam primeiro na planta jovem com consequente redução da fotossíntese.

Temperaturas médias mais altas, durante EC2, geralmente tendem a antecipar a antese, assim como podem causar aborto floral. O desenvolvimento floral e a fertilização dos grãos podem ocorrer até com temperaturas de até 43 °C, 15% a 30% de umidade relativa do ar, desde que haja umidade disponível no solo. Altas e baixas temperaturas estimulam perfilhamento basal. Geralmente, temperaturas noturnas baixas propiciam maior incidência de doença açucarada, diminuindo a produção de grãos.

Sorgo Com e Sem Taninos

Toda planta de sorgo possui aproximadamente os mesmos níveis de proteína. Mas os níveis de proteína na planta não são dependentes da presença de substâncias nitrogenadas e essas substâncias não dependem da disponibilidade de nitrogênio no solo. Amido, lipídios, etc., porém vários compostos fenólicos podem ocorrer ou não, e entre esses compostos destaca-se o tanino condensado que tem ação antinutricional principalmente para os

animais monogástricos. Como esses polifenóis são metabólitos secundários, ou seja, não participam de vias metabólicas responsáveis por crescimento e reprodução, a presença e a natureza deles variam enormemente.

Os vários compostos fenólicos presentes no grão de sorgo podem afetar a cor, a aparência e a qualidade nutricional. Esses compostos podem ser classificados em três grupos básicos: ácidos fenólicos, flavonoides e taninos. Os ácidos fenólicos são encontrados em todo tipo de sorgo, ao passo que flavonoides podem ser detectados em muitos, porém não em todo sorgo. O fenol conhecido como tanino encontra-se concentrado na testa da semente. A testa é um tecido altamente pigmentado localizado logo abaixo do pericarpo. Existem duas classes de taninos: hidrolizáveis e condensados. Não há evidências da presença de grandes quantidades de tanino hidrolizável no sorgo. Já o tanino condensado é aquele que é encontrado em materiais de sorgo resistentes a pássaros.

A presença do tanino no grão de sorgo depende da constituição genética do material. Caso os genótipos possuam os genes dominantes B_1 e B_2 , este genótipo é considerado com presença de tanino. O tanino está presente ou ausente no grão. Percentuais abaixo de 0,70% no grão, verificados em algumas análises laboratoriais, são devidos a outros fenóis e não ao tanino condensado, e, normalmente, não são prejudiciais à dieta alimentar dos animais. Informações de herança deste caráter encontram-se no Capítulo 8.

O tanino no sorgo tem causado bastante controvérsia, uma vez que, apesar de algumas vantagens agronômicas, como a resistência a pássaros e doenças do grão, ele causa problemas na digestão dos animais pelo fato de se formarem complexos com proteínas e assim diminuir a sua palatabilidade e digestibilidade, e, quando presentes, inibem a produção de gases, principalmente, metano pelos ruminantes

Resistência a Doenças

A resistência genética para a maioria das doenças de sorgo pode ser encontrada sob a forma de herança simples e dominante, o que facilita consideravelmente a obtenção de cultivares resistentes. A integração da resistência genética associado a adequados sistemas de produção mostra ser a forma mais correta e estável estratégia de controle de doenças para a cultura.

O avanço da cultura do sorgo no País deveu-se também ao desenvolvimento de materiais geneticamente superiores, tanto do ponto de

vista de produtividade quanto de outras características, principalmente a resistência às doenças como a antracnose (*Colletotrichum sublineolum*), a ferrugem (*Puccinia purpurea*), a helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*) e o míldio (*Peronosclerospora sorghi*).

Apesar deste avanço, problemas relacionados à dinâmica populacional destes patógenos e à própria expansão da cultura têm sido motivo de preocupação por parte da pesquisa na área fitopatológica.

O controle destas doenças é obtido pela utilização de cultivares geneticamente resistentes. A variabilidade genética existente no germoplasma de sorgo tem permitido a obtenção de fontes de resistência, que vêm sendo intensamente utilizadas em programas de melhoramento para a obtenção de híbridos geneticamente resistentes.

A doença açucarada do sorgo, conhecida também como “ergot” ou mela da panícula, foi constatada pela primeira vez no Brasil em 1995. Atualmente, essa doença tem ocorrido de maneira severa e generalizada em todas regiões do Brasil, tornando-se um sério problema para as indústrias de sementes e para os produtores de grãos e/ou forragens de sorgo. Como o patógeno infecta somente o ovário não fertilizado, durante a antese, todos os fatores climáticos e biológicos que afetam a produção e vigor do pólen e/ou impedem a abertura normal das anteras vão favorecer o patógeno a induzir e desenvolver a doença açucarada. O agente causal dessa doença é o fungo *Sphacelia soghi*, a forma imperfeita de *Claviceps africana*. Não há registro de resistência genética para o controle de ergot em sorgo.

A utilização de fungicidas para proteção das flores é uma ferramenta importante e imprescindível no controle da doença açucarada, somente em campo de produção de sementes híbridas de sorgo. No caso de campo de produção de silagem sugere-se o uso de cultivares bem adaptadas à região de plantio e mais tolerantes às baixas temperaturas e semeadura em épocas adequadas, de modo a se evitar que o período de florescimento coincida com baixas temperaturas.

Resistência a Insetos-Pragas

A lagarta-do-cartucho tem se tornado uma praga importante para a cultura do sorgo. Embora fosse esperado um fato semelhante ao que aconteceu com o pulgão-verde, ou seja, um aumento da ação dos inimigos naturais também sobre a população das pragas em geral, incluindo a lagarta-do-cartucho, isto não vem se verificando na prática. Tanto nos plantios de

verão como na safrinha, tanto no milho como no sorgo, tem-se registrado um aumento da incidência da lagarta-do-cartucho. Entretanto, métodos alternativos de controle dessa praga necessitam ser implementados, pois o uso somente do controle químico e/ou resistência genética pode ser desastrosos especialmente para o sorgo, por causa da eliminação dos inimigos naturais.

Em geral, tem sido observado também um aumento da incidência da broca-da-cana tanto no sorgo como no milho. Isto pode ser consequência do aumento da área com o plantio direto ou plantios de sorgo junto de áreas tradicionais produtoras de cana.

A permanência dos colmos de gramíneas, como milho, sorgo e milheto, permite a sobrevivência de larvas da *Diatraea saccharalis* em diapausa durante o inverno, aumentando assim sua população ano após ano. Como o controle químico dessa praga é extremamente difícil, em razão do seu sítio de alimentação, medidas culturais como trituração mecânica dos restos culturais da palhada tornam-se essenciais para a redução da população dessa espécie. O controle biológico também é possível e viável, entretanto, mais estudos são necessários para ajustar os atuais métodos utilizados na cultura da cana-de-açúcar para as culturas anuais.

Sistemas de manejo integrado de pragas para a cultura do sorgo utilizando rotação de culturas, preparo reduzido do solo, uso diferenciado de fertilizantes, variedades resistentes são utilizados para melhorar o rendimento, reduzir custos de produção e impacto ambiental. Porém, existem interações dessas práticas com a densidade de pragas, necessitando ser estudadas para cada espécie de importância econômica. Em regiões onde o uso do manejo integrado de pragas é frequente, o método cultural é o mais empregado, utilizando técnicas de preparo do solo, rotação de cultura, manejo de fertilizantes e o uso de variedades resistentes.

Gene BMR (*Brown Midrib*)

As plantas mutantes *bmr* (portadores de nervura marrom) são fenotipicamente caracterizadas pela presença de pigmentos amarronzados na nervura central das folhas e no colmo. Estes pigmentos estão fortemente associados à lignina, pois persistem na parede celular após a remoção de celulose e hemiceluloses.

As plantas mutantes *bmr* têm atraído a atenção dos pesquisadores por apresentarem maior degradabilidade ruminal em comparação às plantas normais isogênicas. Plantas mutantes *bmr* possuem menor teor de lignina

polimerizada e uma quantidade considerável de substâncias polifenólicas solúveis que não interferem na digestibilidade da parede celular como as ligninas normais.

A composição química da parede celular das plantas mutantes pode apresentar redução do teor de lignina e/ou redução da concentração do ácido *p*-cumárico e/ou maior teor de xilose. Além disso, as ligninas dos híbridos mutantes podem ser distinguidas estruturalmente das ligninas das plantas normais por apresentarem menor relação molar entre unidades siringilpropano e guaiacilpropano (S/G) e/ou menor formação dos produtos da oxidação alcalina com nitrobenzeno e/ou a presença de unidades 5-hidroxiguaiacil. Essas modificações fenotípicas decorrem da alteração da atividade das enzimas ácido cafeico 3-O-metiltransferase (COMT) e/ou cinamoil álcool desidrogenase (CAD), envolvidas na biossíntese das ligninas, provocadas pelos genes *bmr*.

A mutação no sorgo foi provocada a partir do tratamento químico das sementes com di-etil sulfeto. A partir desse tratamento foram gerados 19 mutantes *bmr* de ocorrência independente identificados em progênes segregadas. Alguns desses mutantes apresentam redução significativa do conteúdo de lignina e aumento da digestibilidade da parede celular. A partir destes 19 genes foram selecionados três de melhores características agrônômicas (*bmr-6*, *bmr-12* e *bmr-18*) (Fritz et al., 1988).

Oliver et al. (2005) avaliaram os efeitos da mutação *bmr-6* e *bmr-12* sobre a composição química e a produção de quatro cultivares de sorgo forrageiro nas condições dos Estados Unidos, colhidos aos 116 dias após o plantio. Observou-se que as plantas mutantes apresentaram o mesmo teor de FDN em relação às plantas normais. Quanto ao teor de FDA, observou-se uma interação entre a cultivar e o tipo de gene mutante presente, e a média entre as quatro cultivares mostrou que as plantas *bmr-6* apresentaram menor teor de FDA em relação às plantas normais e às plantas *bmr-12*.

O teor de lignina foi menor nas plantas *bmr-12* em relação às plantas normais e àquelas *bmr-6*. Quanto à digestibilidade *in vitro* da FDN (DIVFDN), as plantas mutantes (*bmr-6* e *bmr-12*) foram superiores em relação às plantas normais. Segundo os autores, nas plantas *bmr-12*, o aumento da DIVFDN baseia-se na redução do teor de lignina, entretanto nas plantas *bmr-6* este aumento pode ser por causa da modificação química da lignina determinada pela redução da atividade da enzima COMT ou da escolha do método analítico para lignina (lignina em detergente ácido), que

determina somente a lignina *core*, altamente condensada e muito resistente à degradação.

Os autores avaliaram cinco cultivares, e mostraram que os híbridos normais foram os mais produtivos, sendo que esses foram 10% mais produtivos que os mutantes *bmr-12* e 15% mais produtivos que os mutantes *bmr-6*. A produtividade variou de 10,1 t de MS/ha para um mutante *bmr-6* a 15,9 ton de MS/ha para uma planta normal.

Ribas (2010) avaliou vinte e cinco híbridos de sorgo com capim-sudão, normais e mutantes *bmr*, avaliados aos 51 dias após o plantio e aos 31 dias de rebrota, nas condições de Minas Gerais, e observou que a altura das plantas nos dois cortes foi superior nos híbridos normais e menor nos mutantes *bmr*.

A DIVMS dos mutantes *bmr* foi em média 7% acima dos híbridos normais. A PB foi 10,7% superior nos mutantes *bmr*. O maior teor de PB nos mutantes não pode ser creditado apenas aos efeitos da mutação e sim à diferença de acúmulo de MS observado entre os híbridos avaliados.

Comparado a várias fontes forrageiras, os híbridos de sorgo com capim-sudão podem ser considerados excelentes alimentos volumosos para a suplementação de ruminantes por causa do alto consumo e da alta digestibilidade de suas frações fibrosas.

Apesar da descoberta dos genes mutantes *bmr* e das vantagens de sua utilização na alimentação animal, principalmente em relação à degradabilidade dos carboidratos constituintes da parede celular, cultivares mutantes adaptadas para produção de silagem de sorgo não foram ainda usadas comercialmente no Brasil.

Considerações Finais

Existe grande diversidade de sorgos silageiros no Brasil e grande potencial genético a ser explorado. Fica evidente, também, que há necessidade de certos cuidados quando compararmos o sorgo com outras culturas para silagem, principalmente o milho, já que poderemos estar nos referindo a sorgos que apresentam características muito distintas daquelas indicadas para esse fim, sendo que apenas o sorgo forrageiro adaptado para produção de silagem de alta qualidade ou silageiro é o que apresenta características similares. Assim, a comparação com outros tipos e diferentes épocas de colheita e manejo deve ser feita com ressalvas.

Para se produzir uma silagem de alta qualidade é muito importante

estar atento a algumas regras básicas, que se iniciam antes mesmo do plantio propriamente dito. E muitos desses cuidados não vão custar nada a mais, ou onerar muito pouco para o produtor, e poderão resultar numa silagem de melhor qualidade e menor custo, tais como: a) escolha da área e preparo adequado do solo; b) correção e adubação do solo; c) escolha da cultivar; d) operações de plantio (profundidade da semente, quantidade de adubo, velocidade de plantio, uso adequado do disco da plantadeira, etc.); e) condução da lavoura (controle de plantas espontâneas, pragas, doenças); f) estágio de colheita; g) cuidados na ensilagem (compactação, tamanho de partículas, vedação); h) retirada e fornecimento de silagem aos animais.

O programa de melhoramento de sorgo forrageiro para silagem deve focar, entre outros aspectos, nas características herdáveis na planta que estejam relacionadas com um processo de fermentação adequado, alta digestibilidade da fibra, consumo de forragem e desempenho animal.

A maior porcentagem de grãos na matéria seca total na planta de sorgo assegura o maior valor nutritivo da silagem, e aumenta o teor de matéria seca da silagem, o que proporciona maior consumo de ração pelos animais, com consequente ganho no desempenho animal.

Referências

AGRICULTURAL, AND FOOD RESEARCH COUNCIL. Technical Committee on Responses to Nutrients. Report 2: characterization of feedstuffs: nitrogen. **Nutrition Abstracts and Reviews. Series B**, v. 57, p. 713-736, 1987.

AMIN, W. F.; MELLO, S. de P. Avaliação da qualidade das silagens de girassol, milho, sorgo e milheto em diferentes espaçamentos. **Revista Nucleus Animalium**, v. 1, n. 1, p. 129-142, 2009.

ANDRADE, J. B.; FERRARI JÚNIOR, E.; BRAUN, G. Valor nutritivo da silagem de cana-de açúcar tratada com uréia e acrescida de rolão-de-milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1169-1174, 2001.

ARAÚJO, V. L.; RODRIGUEZ, N. M.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; BORGES, I.; BORGES, A. L. C. C.; SALIBA, E. O. S. Qualidade das silagens de três híbridos ensilados em cinco diferentes estádios de maturação. **Arquivo Brasileiro Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 59, n. 1, p. 168-174, 2007.

BORGES, A. L. C. C. **Qualidade de silagens de híbridos de sorgo de porte alto com diferentes teores de tanino e de umidade no colmo, e seus padrões de fermentação**. 1995. 104 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.

CASTRO, F. G. F. **Uso de pré-emurchecimento, inoculante bacteriano-enzimático ou ácido propiônico na produção de silagem de Tifton 85 (Cynodon sp.)**. 2002. 136 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

DEU, M.; HAMON, P. The genetic organization of sorghum. **Agriculture et Développement**, p. 25-30, 1994. Special issue.

DOGGETT, H. **Sorghum**. 2. ed. Essex: Longman Scientific and Technical, 1988.

EVANGELISTA, A. R.; LIMA, J. A. **Silagens: do cultivo ao silo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2000. 196 p.

FERNANDES, L. O.; PAES, J. M. V.; REIS, R. A.; SILVA, E. A.; SOUZA, J. A. Cultivares de milho e sorgo para a produção de silagem: safra 2003/2004. **FAZU em Revista**, n. 6, p. 83-86, 2009.

FRANÇA, I. S.; SILVA, J. C. S.; LIMA, P. Q. Importância do sorgo na pecuária bovina leiteira no Brasil. **Nutritime**, n. 1, p. 4964-4969, 2017.

FREITAS, G. A. R. **Consumo e digestibilidade aparente das silagens de cinco genótipos de milho (Zea mays L.)**. 2002. 50 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição Animal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

FRITZ, J. O.; MOORE, K. J.; JASTER, E. H. Digestion kinetics and cell wall composition of brown midrib sorghum x sudangrass morphological components. **Crop Science**, v. 30, n. 1, p. 213-219, 1988.

GONÇALVES, L. C.; PIRES, D. A. A.; CASTRO, G. H. F. Algumas considerações sobre silagens de sorgo. In: SIMPÓSIO DE NUTRIÇÃO DE GADO DE LEITE, 3., 2005, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, [s.n], 2005. p. 5-18.

LIRA, M. A.; FARIS, M. A. Aspectos gerais da cultura do sorgo no Brasil: região nordeste. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SORGO, 1., 1977, Brasília, DF. **Anais...** Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 1979. p. 31-38.

MACHADO, F. S. **Avaliação agrônômica e nutricional de três híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e de suas silagens em três estádios de maturação.** 2009. 107 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; SCHAFFERT, R. E. **Fisiologia da planta de sorgo.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 46 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 3).

MELLO, A. O. A. Volumosos para bovinos de corte. In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS: TEMAS EM EVIDÊNCIA, 3., 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. v. 3, p. 233-260.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient requirements of dairy cattle.** Washington: National Academic Press, 1989. 90 p.

NEUMANN, M.; RESTLE, J.; ALVES FILHO, D. C.; BRONDANI, I. L.; PELLEGRINI, L. G. de; FREITAS, A. K. de. Avaliação do valor nutritivo da planta e da silagem de diferentes híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 1, p. 293-301, 2002.

NOGUEIRA, F. A. S. **Qualidade das silagens de híbridos de sorgo de porte baixo com e sem teores de taninos e de colmo seco e succulento, e seus padrões de fermentação, em condições de laboratório.** 1995. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.

NUSSIO, L. G. Cultura de milho para produção de silagem de alto valor alimentício. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 4., 1991, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1991. p. 59-168.

NUSSIO, L. G.; PAZIANI, S. D. F.; NUSSIO, C. M. B. Ensilagem de capins tropicais. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39., 2002, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2002.

OLIVEIRA, R. P.; FRANÇA, A. F. S.; RODRIGUES FILHO, O.; OLIVEIRA, E. R.; ROSA, V.; SOARES, T. V.; MELLO, S. Q. S. Características agrônômicas de cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sob três doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 1, p. 45-53, 2005.

OLIVER, A. L.; PEDERSEN, J. F.; GRANT, R. J.; KLOPFENSTEIN, T. J. Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. **Crop Science**, v. 45, n. 6, p. 2234-2239, 2005.

PAIVA, J. A. J. **Qualidade da silagem da região metalúrgica de Minas Gerais**. 1976. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1976.

PEREIRA NETO, M.; MACIEL, F. C.; VASCONCELOS, R. M. J. de. **Produção e uso de silagens**. Natal: EMPARN, 2009. 30 p. (EMPARN. Circuito de Tecnologias Adaptadas para a Agricultura Familiar, 2).

PIRES, D. A. A. **Consumo e digestibilidade aparente em ovinos, de silagens de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.)) com e sem tanino nos grãos**. 2003. 53 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

QUINBY, J. R. **Sorghum improvement and the genetics of growth**. College Station: Texas A. M. University Press, 1974. 108 p.

RIBAS, M. N. **Avaliação agrônômica e nutricional de híbridos de sorgo com capim-sudão, normais e mutantes bmr - portadores de nervura marrom**. 2010. 140 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RODRIGUES, J. A. S.; MENEZES, C. B. de; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; TABOSA, J. N. Utilização do sorgo na nutrição animal. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 229-246. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

SIMPLÍCIO, J. B.; TABOSA, J. N.; BARROS, A. H. C.; SILVA, F. G. da.; FILHO, F. J. e; ANDRADE, J. J. de. Avaliação de diferentes cultivares de sorgo irrigados e submetidos a quatro ciclos sucessivos, no semiárido alagoano. In: PEREIRA, A. I. A. (Org.). **De grão em grão**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2019. p. 22-32.

VALADARES FILHO, S. C.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; CAPPELLE, E. R. **Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos: CQBAL 2.0**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 297 p.

ZAGO, C. P. Cultura do sorgo para produção de silagem de alto valor nutritivo. In: SIMPÓSIO SOBRE NUTRIÇÃO DE BOVINOS, 4., 1991, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1991.

ZAGO, C. P. Silagem de sorgo de alto valor nutritivo. In: CRUZ, J. C., PEREIRA FILHO, I. A. RODRIGUES, J. A. S., FERREIRA, J. J. (ed.). **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. p. 519-544.

Literatura Recomendada

BUSO, W. H. D.; MORGADO, H. S.; SILVA, L. B.; FRANÇA, A. F. de. Utilização do sorgo forrageiro na alimentação animal. **PUBVET**, v. 5, n. 23, artigo 1145, 2011.

BUXTON, D. R.; RUSSEL, J. R. Lignin constituents and cell-wall digestibility of grass and legume stems. **Crop Science**, v. 28, n. 3, p. 553-558, 1988.

CABRAL, L. da S.; VALADARES FILHO, S. de C.; DETMANN, E.; ZERVOUDAKIS, J. T.; PEREIRA, G. O.; VELOSO, R. G.; PEREIRA, E. S. Cinética ruminal as frações de carboidratos, produção de gás, digestibilidade *in vitro* da matéria seca e NDT estimado da silagem de milho com diferentes proporções de grãos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 2332-2339, 2002.

CARVALHO, B. F.; ÁVILA, C. L. S.; PINTO, J. C.; PEREIRA, M. N.; SCHWAN, R. F. Effects of propionic acid and *Lactobacillus buchneri* (UFLA SIL72) addition on fermentative and microbiological characteristics of sugar cane silage treated with and without calcium oxide. **Grass and Forage Science**, v. 67, n. 4, p. 4620-4647, 2012.

CHAVES, A. V. **Avaliação de cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) para produção de silagem**. 1997. 35 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. **Seja o doutor do seu sorgo**. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 24 p. (Arquivo do Agrônomo, 14). Encarte do Informações Agronômicas, n.100, dez. 2002.

COELHO, D. S.; SIMÕES, W. L.; MENDES, A. M. S.; DANTAS, B. F.; RODRIGUES, J. A. S.; SOUZA, M. A. de. Germinação e crescimento inicial de variedades de sorgo forrageiro submetidas ao estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 25-30, 2014.

CORREA, R. A.; SILVA, L. das D. F. da; BETT, V.; CASTRO, V. de S.; RIBEIRO, E. L. de A.; BERAN, F. H. B.; ROCHA, M. A. da; EZEQUIEL, J. M. B.; MASSARO JÚNIOR, F. L. Consumo e digestibilidade aparente de alguns componentes nutritivos da silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) com ou sem aditivos, em ovinos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, n. 1, p. 151-158, 2007.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S.; FERREIRA, J. J. **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 544 p.

CUMMINS, D. G. Relationship between tannin content and forage digestibility in sorghum. **Agronomy Journal**, v. 63, p. 500-502, 1971.

DEMARCHI, J. J. A. A.; BOIN, C.; BRAUN, G. A cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) para a produção de silagens de alta qualidade. **Zootecnia**, v. 33, n. 3, p. 111-136, 1995.

DIAS, A. M. A.; BATISTA, A. M. V.; FERREIRA, M. A.; LIRA, M. de A.; SAMPAIO, I. B. M. Efeito do estágio vegetativo do sorgo, sobre a composição química da silagem, consumo, produção e teor de gordura do leite para vacas em lactação, em comparação à silagem de milho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, p. 2086-2092, 2001. Suplemento.

DIAWARA, M. M.; HILL, N. S.; WISEMAN, B. R.; ISENHOUR, D. J. Panicle-stage resistance to *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in converted Sorghum accessions. **Journal of Economic Entomology**, v. 84, n. 1, p. 337-344, 1991.

DIXON, R. A.; CHEN, F.; GUO, D.; PARVATHI, K. The biosynthesis of monolignols: a “metabolic grid”, or independent pathways to guaiacyl and syringyl units? **Phytochemistry**, v. 7, n. 57, p. 1069-1084, 2001.

FERNANDES, L. O.; FREITAS FILHO, J. R. de; PAES, J. M. V.; LANDIM, V. J. C.; SILVA JÚNIOR, A. H. da; PEREIRA, F. T. R.; NEPOMUCENO, P. T. O.; COSTA, L. F. Terminação de bovinos 1/2 Nelore 1/2 Limousin em diferentes sistemas durante o período da seca. **FAZU em Revista**, n. 2, p. 103-117, 2005a.

FERNANDES, L. O.; PERAZZOLI, C. H.; PAES, J. M. V.; LANDIM, V. J. C.; SILVA JÚNIOR, A. H. da; SANTOS, A. T.; SANTOS, G. O. Desempenho de bovinos da raça Nelore terminados em diferentes sistemas durante o período da seca. **FAZU em Revista**, n. 2, p. 168-177, 2005b.

KISHIMOTO, T.; CHIBA, W.; SAITO, K. Influence of syringyl to guaiacyl ratio on the structure of natural and synthetic lignins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 2, p. 895-901, 2010.

MAGALHÃES, P. C.; RODRIGUES, W. A.; DURÃES, F. O. M. **Tanino no grão de sorgo: bases fisiológicas e métodos de determinação.** Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 1997. 26 p. (Embrapa-CNPMS. Circular Técnica, 27).

MELLO, R.; NÖRNBERG, J. L.; ROCHA, M. G. Potencial produtivo e qualitativo de híbridos de milho, sorgo e girassol para ensilagem. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 10, n. 1, p. 87-95, 2004.

MELOTTI, L.; BOIN, C.; LOBÃO, A. O. Determinação do valor nutritivo da silagem de sorgo (*Sorghum vulgare*, Pers) var. Santa Eliza, em cinco estádios de maturação, através de ensaio de digestibilidade (aparente) com carneiros. **Boletim Industria Animal**, v. 26, n. 1, p. 321-324, 1969.

MOLINA, L. R.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, N. M.; RODRIGUES, J. A. S.; FERREIRA, J. J.; FERREIRA, V. C. P. Avaliação agronômica de seis híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 52, n. 4, p. 385-390, 2000.

MONTAGNER, D.; ROCHA, M.; NÖRNBERG, J.; CHIELLE, Z.; MANDADORI, R. ESTIVALET, R.; CALEGARI, C. Características agronômicas e bromatológicas de cultivares avaliados no ensaio sul-riograndense de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 11, n. 4, p. 447-452, 2005.

NEUMANN, M.; RESTLE, J.; NORNBERG, J.; OLIBONI, R.; PELLEGRINI, L. G. de; FARIA, M. V.; OLIVEIRA, M. R. Efeito associativo do espaçamento entre linhas de plantio, densidade de plantas e idade sobre o desempenho vegetativo e qualitativo do sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 7, n. 2, p. 165-181, 2008.

PARFITT, J. M. B. (Coord.). **Produção de milho e sorgo em várzea.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2000. 146 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 74).

PARRELLA, R. A. da C.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; DAMASCENO, C. M. B.; SCHAFFERT, R. E. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).

PARRELLA, R. A. da C.; SCHAFFERT, R. E.; MAY, A.; EMYGDIO, B.; PORTUGAL, A. F.; DAMASCENO, C. M. B. **Desempenho agrônômico de híbridos de sorgo biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 19 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 41).

PEDREIRA, M. S.; REIS, R. A.; BERCHIELLI, T. T.; MOREIRA, A. L.; COAN, R. M. Características agrônômicas e composição química de oito híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 5, p. 1083-1092, 2003.

PENDERSSEN, J. F.; VOGEL, K. P.; FUNNELL, D. Impact of reduced lignin on plant fitness. **Crop Science**, v. 45, n. 3, p. 812-819, 2005.

PEREIRA, D. H.; PEREIRA, O. G.; VALADARES FILHO, S. C.; GARCIA, R.; OLIVEIRA, A. P.; MARTINS, F. H.; VIANA, V. Consumo, digestibilidade dos nutrientes e desempenho de bovinos de corte recebendo silagem de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e diferentes proporções de concentrado. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 35, n. 1, p. 282-291, 2006.

PESCE, D. M. C.; GONCALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; RODRIGUEZ, N. M.; BORGES, I. Análise de vinte genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), de portes médio e alto, pertencentes ao Ensaio Nacional. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 4, p. 978-987, 2000.

PIRES, A. J. V.; REIS R. A.; CARVALHO, G. G. P.; SIQUEIRA, G. R.; BERNARDES, T. F.; RUGGIERI, A. C.; ROTH, M. T. P. Degradabilidade ruminal da matéria seca, da proteína bruta e da fração fibrosa de silagens de milho, de sorgo e de *Brachiaria brizantha*. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 62, n. 2, p. 391-400, 2010.

PIRES, D. A. A.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; JAYME, D. G.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; RODRIGUEZ, N. M.; BORGES, I.; BORGES, A. L. C. C.; JAYME, C. G.; BOTELHO, P. R. F.; LIMA, L. O. B. Degradabilidade *in situ* das frações fibrosas da silagem de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 8, n. 2, p. 175-185, 2009.

PIRES, D. A. A.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; JAYME, D. G.; GONÇALVES, L. C.; RODRIGUES, J. A. S.; RODRIGUEZ, N. M.; BORGES, I.; BORGES, A. L. C. C.; JAYME, C. G. Qualidade e valor nutritivo das silagens de três híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) colhidos em diferentes estádios de maturação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 2, p. 241-256, 2006.

RESENDE, J. A. **Características agronômicas, químicas e degradabilidade ruminal da silagem de sorgo**. 2001. 53 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

RIBAS, P. M. Importância econômica. In: RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. G. dos (Org.). **Cultivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa-CNPMS, 2007. p. 3-5. (Embrapa- CNPMS. Sistemas de Produção, 2).

RIBAS, P. M. **Cultivo do sorgo**. 2013. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_8_ed/plantio-plantio.html>. Acesso em: 10 ago. 2014.

RODRIGUES FILHO, O.; FRANÇA, A. F. S.; OLIVEIRA, R. P.; OLIVEIRA, E. R.; ROSA, B.; SOARES, T. V.; MELLO, S. Q. S. Produção e composição de quatro híbridos de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* L. Moench) submetidos a três doses de nitrogênio. **Ciência Animal Brasileira**, v. 7, n. 1, p. 37-48, 2006.

RODRIGUES, L. R.; SILVA, P. R. F. (Org.). **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: safras 2011/2012 e 2012/2013**. Porto Alegre: Fepagro, 2011 (Indicações Técnicas). Disponível em: <http://issuu.com/fepagro/docs/litms_2011>. Acesso em: 8 out. 2014.

RODRIGUES, W. A.; MAGALHÃES, P. C.; SANTOS, F. G.; BETERCHINE, A. G.; TOSELLO, G. A. Métodos para determinar tanino em sorgo, avaliando-se o desempenho de aves e a digestibilidade in vitro da matéria seca. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 22, n. 4, p. 540-550, 1998.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 39, n. 2, p. 397-400, 1999.

SILVA, A. G. da; BARROS, A. S.; TEIXEIRA, I. R. Avaliação agronômica de cultivares de sorgo forrageiro no sudoeste do Estado de Goiás em 2005. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, n.1, p. 116-127, 2007.

SILVA, A. G.; ROCHA, V. S.; CECON, P. R.; PORTUGAL, A. F.; PINA FILHO, O. C. Avaliação dos caracteres agronômicos de cultivares de sorgo forrageiro sob diferentes condições termo-fotoperiódicas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 1, p. 28-44, 2005.

SILVA, F. F. **Qualidade de silagens de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) de portes baixo, médio e alto com diferentes proporções de colmo + folhas/panícula**. 1997. 94 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

SILVA, L. C. R.; RESTLE, J. Avaliação do milho (*Zea mays* L.) e do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) para produção de silagem. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 30., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1993. p. 467.

TONANI, F. L. **Valor nutritivo das silagens de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em diferentes estádios de maturação dos grãos**. 1995. 56 p. Dissertação - (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

VALADARES, R. F. D. Degradabilidade “in situ” da proteína bruta de vários alimentos em vacas em lactação. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 27., 1990, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1990. p. 60.

VALENTE, J. O. **Produtividade de duas variedades de milho (*Zea mays* L.) e de quatro variedades de sorgo (*Sorghum vulgare* (L.Moench) e valor nutritivo de suas silagens.** 1977. 52 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1977.

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant.** 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994. 476 p.

VIANA, A. C.; RIBAS, P. M.; MIRANDA, J. E. C. Manejo cultural do sorgo forrageiro. In: CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S.; FERREIRA, J. J. (Ed.). **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. p. 263-287.

VIÉGAS, G. P.; BANRATTO, N. V. **Sorgos graníferos e forrageiros de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1983.

VON PINHO, R. G.; VASCONCELOS, R. C.; BORGES, I. D.; RESENDE, A. V. Produtividade e qualidade da silagem de milho e sorgo em função da época de semeadura. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 235-245, 2007.

WARRICK, B. E. **How a sorghum plant develops.** College Station: Texas A&M, 2000.

Capítulo 10

Cultivares de sorgo para produção de bioenergia

Rafael Augusto da Costa Parrella

Maria Lúcia Ferreira Simeone

Nádia Nardely Lacerda Durães Parrella

Robert Eugene Schaffert

Introdução

O rápido aumento da população global e o desenvolvimento econômico concomitante levam ao aumento da demanda por energia e alimento. O uso contínuo de combustíveis fósseis para atender a demanda por energia resulta em altos níveis de poluição atmosférica, rápido esgotamento das reservas de combustível fóssil e emissão de gases de efeito estufa (GEE), que contribuem para a mudança climática global. Fontes renováveis de energia, incluindo solar, eólica e bioenergia, podem ajudar a mitigar os efeitos negativos associados ao uso de combustíveis fósseis e representam uma parcela crescente do portfólio de energia (Sandesh; Ujwal, 2021).

Neste contexto, os biocombustíveis são de especial interesse, porque são a única fonte de combustível líquido, que é renovável e compatível com a frota de veículos existente no Brasil na atualidade. Estudos mostram que o uso de bioetanol misturado à gasolina em automóveis tem o potencial de reduzir significativamente o uso de petróleo e diminuir as emissões de GEE (Balat; Balat, 2009; Soares et al., 2009). Além disso, como os biocombustíveis se originam de biomassa vegetal, a produção deles pode contribuir para o desenvolvimento econômico rural.

Os tipos de sorgo para síntese de bioenergia produzem açúcares fermentescíveis nos colmos, possuem alta produtividade de fibra e ainda produzem grãos (amido) nas panículas. Sendo assim, o sorgo é considerado uma cultura de grande potencial para a produção de biocombustíveis (Rooney et al., 2007), e de grande interesse para o setor sucroenergético. Os

grãos ricos em amido, bem como os açúcares extraídos do colmo, podem ser utilizados para produção de etanol. O bagaço, resultante da extração do caldo, pode ser usado para gerar calor a partir da queima, como matéria-prima lignocelulósica para a produção de biocombustíveis de segunda geração, ou como fonte de biogás em digestores anaeróbicos (Almeida et al., 2019a; Molaverdi et al., 2013).

Principais Características no Desenvolvimento das Cultivares de Sorgo Biomassa e Sacarino

O sorgo para bioenergia envolve os tipos sacarino e biomassa, que apresentam porte alto (3-5 m) associado a alta produtividade de biomassa, superior a 100 t/ha de matéria verde e 30 t/ha de matéria seca.

Os genes de nanismo (*dw1*, *dw2*, *dw3* e *dw4*) controlam o porte em sorgo, e os alelos dominantes em todos os locus conferem o maior porte, superior a 3 m (Quinby, 1974). Os genes de maturidade (*Ma1*, *Ma2*, *Ma3*, *Ma4*, *Ma5* e *Ma6*) controlam o ciclo e a sensibilidade ao fotoperíodo (Rooney; Aydin, 1999). Assim, a combinação desses genes pode resultar em cultivares sensíveis (ciclo 150 a 180 dias) e insensíveis (ciclo 110 a 130 dias) ao fotoperíodo, ambas de alto porte e alta produtividade de biomassa (Figura 1).



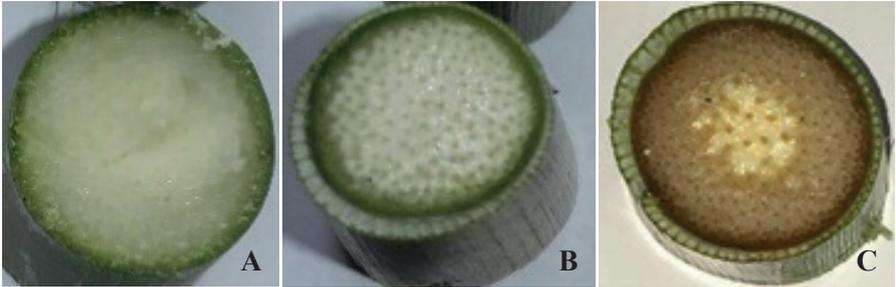
Figura 1. Híbridos de sorgo biomassa A e sacarino B sensíveis ao fotoperíodo, desenvolvidos pelo programa de melhoramento da Embrapa, safra 2019/2020.

O sorgo sensível ao fotoperíodo floresce apenas quando os dias possuem menos de 12 horas e 20 minutos de luz (Rooney; Aydin, 1999), que corresponde ao período entre 21 de março e 22 de setembro, na maior parte do Brasil. Assim, quando o sorgo sensível é semeado nos meses de outubro a dezembro no Brasil, quando o fotoperíodo é maior que 12 horas e 20 minutos, a indução do desenvolvimento da gema floral só ocorrerá a partir de 21 de março do ano seguinte. Com isso, o ciclo vegetativo e o porte serão ampliados e, concomitantemente, apresentarão maior produção de biomassa por hectare/ciclo em comparação a cultivares fotoinsensíveis, que florescem em qualquer época do ano e apresentam ciclo curto de 110 a 130 dias (Parrella et al., 2018).

A grande estratégia na síntese destes híbridos fotossensíveis de sorgo é aumentar o período vegetativo e conseqüentemente o ciclo, que reflete em maior crescimento e produção de biomassa fresca e seca. Estas características são fortemente associadas (Murray et al., 2008a, 2008b, 2009), apresentando correlação superior a 80%, mostrando que os genótipos de maior produtividade de matéria verde também apresentam maior produção de massa seca. Castro et al. (2015), em avaliações de híbridos de sorgo biomassa em Lavras-MG, observaram uma variação na produção de 24 a 47 t ha⁻¹ de matéria seca, confirmando o grande potencial produtivo destes tipos de híbridos. Na avaliação de híbridos de sorgo biomassa, Almeida et al. (2019b) alcançaram valores de produtividade de 20 a 35 t.ha⁻¹ de massa seca, confirmando o grande potencial produtivo destes híbridos.

O tipo de colmo é outra característica importante para o sorgo visando a produção de bioenergia, pois afeta o teor de umidade da biomassa e conseqüentemente o teor de matéria seca no momento da colheita (Figura 2). O sorgo possui o gene *Dry*, com os alelos dominantes (*DD* ou *Dd*) controlando o colmo seco (pithy - Figura 2b) e os alelos recessivos (*dd*) controlando a presença de caldo (juice - Figura 2a) (Zhang et al., 2018). O sorgo biomassa se caracteriza pelo genótipo (*DD* ou *Dd*), exibindo baixos teores de umidade nos colmos. Durante a maturidade fisiológica, pode apresentar valores de umidade chegando a 60% e com o teor de fibra superior a 25%. Já o sorgo sacarino, diferentemente do biomassa, apresenta o genótipo (*dd*), sendo rico em caldo nos colmos. Apresenta altos teores de umidade na biomassa no momento da colheita, semelhante à cana-de-açúcar, chegando a 75% de umidade e com o teor fibra próximo a 14%. Assim, o sorgo sacarino é destinado à produção de etanol de primeira geração, e o sorgo biomassa,

à cogeração de energia, etanol de segunda geração e produção de biogás (Parrella et al., 2018).



Fotos: Rafael Augusto da Costa Parrella

Figura 2. Tipos de colmos em sorgo para bioenergia. A Colmo com caldo, B colmo seco e C colmo seco com o gene de nervura marrom (brown midrib - *bmr6*).

Os genótipos de sorgo sacarino apresentam caldo no colmo rico em açúcares fermentescíveis, constituído em sua maior parte por sacarose (64%), seguidos por glicose (22%) e frutose (14%) (Kim; Day, 2011). Sabe-se que os teores de açúcares no caldo variam de acordo com a época de colheita e com os genótipos avaliados. Porém, em todas as cultivares observa-se um rápido acúmulo de açúcar no colmo após a emissão da panícula e do florescimento, com pico de açúcar no colmo coincidindo com a maturação fisiológica do grão (Martins et al., 2017; Souza et al., 2016).

Na avaliação de quatro variedades de sorgo sacarino (BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511), observou-se que a variedade BRS 511 apresentou maior produção de açúcar, com níveis superiores a 140 g/L durante a maior parte do experimento e atingindo um máximo de 191 g/L (Fernandes et al., 2014). Todas as variedades apresentaram comportamentos semelhantes em relação ao teor de amido no caldo, que variou de 3 a 5 g/L de acordo com a época de colheita. A utilização de enzimas amiláceas pode aumentar o rendimento açúcares fermentescíveis. O caldo das cultivares de sorgo sacarino foi fermentado com sucesso em oito horas, e foram obtidas produtividades de etanol de 8,5 a 9,0 g/L e rendimento de 87-90,5% de etanol teórico, semelhante ao observado para o caldo de cana-de-açúcar (Fernandes et al., 2014).

Visando explorar o potencial fermentativo do caldo de sorgo sacarino BRS 511, Pacheco et al. (2014) avaliaram o comportamento de três leveduras comerciais (CAT-1, PE-2 e SA-1) em quatro ciclos fermentativos. Utilizando a levedura CAT-1, foram conduzidas também as fermentações

dos caldos das variedades BRS 506, BRS 507 e BRS 508. Foram retiradas amostras até o completo consumo dos açúcares, que foram quantificadas por cromatografia líquida. Os ciclos não prejudicaram a viabilidade de nenhuma cepa. Os resultados mostraram que não houve diferença no desempenho das leveduras ao longo dos ciclos. As fermentações apresentaram rendimento de aproximadamente 90% e viabilidade celular variando de 82% a 97% para todos os experimentos. Os resultados indicam que as cepas industriais estão adaptadas, e os caldos estão aptos ao processo industrial, nas condições avaliadas (Pacheco et al., 2014). Estes resultados confirmam a alta eficiência do caldo do sorgo para produção de etanol, semelhante à cana e adaptado aos processos industriais das usinas no Brasil e no mundo.

Uma característica de importância no sorgo sacarino é o teor de sólidos solúveis totais no caldo (SST), medido em graus brix (°Brix), que está diretamente correlacionado com o teor de açúcares totais no caldo (Murray et al., 2008b; Ritter et al., 2008; Lombardi et al., 2015). Os açúcares totais são utilizados como alimentos das leveduras na produção de etanol, sendo desejável em maior grau possível.

O índice tonelada de brix por hectare (TBH), que também está diretamente ligado ao potencial de síntese de etanol dos genótipos, é obtido pelo produto da produção de massa verde (PMV) ou toneladas de colmos por hectares (TC) versus o teor de sólidos solúveis totais (°Brix) em unidade. Este índice tem se mostrado bastante útil na seleção de genótipos superiores de sorgo sacarino, por apresentar correlação alta e significativa com o PMV, TC e SST, que são os principais caracteres de sorgo sacarino e estão diretamente correlacionados com a produção de etanol (Lombardi et al., 2015).

Outra característica, importante para o sorgo sacarino é o período de utilização industrial (PUI). O PUI compreende o período em que a cultivar está apta para colheita no campo, mantendo os padrões mínimos de produtividade e qualidade da matéria-prima, que refletem em rendimento de etanol economicamente viável (Schaffert; Parrella, 2012). O PUI é necessário para o planejamento de colheita e processamento da matéria-prima pelas usinas. E deve ser o mais extenso possível, e no mínimo superior a 30 dias, uma vez que atrasos na colheita são comuns em razão de fatores operacionais, como manutenção de maquinários, ou fatores climáticos, como chuvas. Desta forma, cultivares com PUI inferior a 10 dias, por exemplo, apresentam grande risco para o setor sucroalcooleiro, dado que o curto período de tempo, associado aos frequentes atrasos na colheita por parte da

usina, podem resultar em produtividades de etanol abaixo da viabilidade econômica.

A produtividade de etanol das cultivares de sorgo sacarino está associada ao rendimento de colmos por hectares, umidade da biomassa, percentagens de extração de caldo, as quais irão refletir em litros de etanol por tonelada de colmos (Parrella et al., 2018). Neste contexto, a produtividade de colmos das cultivares é uma característica fortemente associada à produtividade de etanol por hectare (Murray et al., 2008a; Ritter et al., 2008; Lombardi et al., 2015), uma vez que o caldo rico em açúcares fermentescíveis é extraído em sua totalidade dos colmos. Assim, quanto maior o rendimento de colmos, maior será a produtividade de caldo por hectare e por consequência maior volume de etanol produzido.

O sorgo sacarino também produz grãos em suas panículas. Porém, neste caso é desejável que a produtividade de grãos seja pequena, em função da competição por fotoassimilados para produção de açúcares solúveis nos colmos com a produção de amido nos grãos. Esta competição ocorre, uma vez que o acúmulo de açúcares nos colmos se inicia após o florescimento, coincidindo com a fase de enchimento de grãos. Além disso, como os cultivares de sorgo sacarino são de porte alto (> 3,0 m), o excesso de grãos nas panículas, no ápice das plantas, tende a favorecer o acamamento. O acamamento no sorgo é indesejável por reduzir o teor de açúcares, aumentar as perdas na colheita, e ainda ampliar o teor de impurezas na colheita das plantas acamadas.

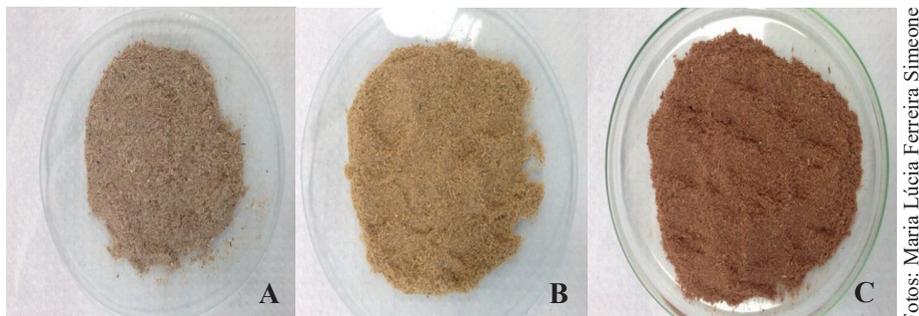
Contudo, a produção de açúcar no caldo em sorgo sacarino não é simples, sendo influenciada pelo genótipo, pelos ambientes e pela interação genótipos x ambientes (Murray et al., 2009). Adicionalmente, o controle genético é realizado por genes de ação aditiva e dominante (Murray et al., 2008a, 2008b). Alguns QTLs relacionados à produção de açúcar em sorgo têm sido identificados (Murray et al., 2008b, 2009; Ritter et al., 2008). E alguns autores já comprovaram a presença de heterose para produção de biomassa, produção de açúcar e concentração de açúcar no caldo (Pfeiffer et al., 2010; Durães et al., 2021). Isto mostra que o desenvolvimento de híbridos de sorgo sacarino é uma estratégia viável para os programas de melhoramento genético. Contudo, vale destacar que ambas as linhagens parentais do híbrido, linhagem A/B e linhagem R, devem apresentar alta concentração de açúcar no caldo para que o híbrido apresente alta produção de açúcares por hectare (Ribeiro et al., 2020).

O programa de melhoramento de sorgo da Embrapa estabeleceu as metas mínimas de produtividade e qualidade do sorgo sacarino para obter rentabilidade com a cultura. Sendo uma produtividade mínima de biomassa de 50 t.ha⁻¹, extração mínima de açúcar total de 80 kg t⁻¹ de biomassa (considerando a eficiência de extração de 90-95%), conteúdo mínimo de açúcar total no caldo de 12,5%, produção mínima de álcool de 60L t⁻¹ de biomassa e período de utilização industrial (PUI) de no mínimo 30 dias (Schaffert; Parrella, 2012). Neste sentido, as cultivares de sorgo sacarino de ciclo curto (110 a 130 dias) apresentam potencial produtivo superior a 3.000 L/ha e as de ciclo longo (150 a 170 dias) apresentam potencial produtivo superior a 4.000 L/ha. O sorgo sacarino mostra ser uma oportunidade a mais para o setor, visando produção adicional de matéria-prima para as usinas de cana-de-açúcar.

A composição química da biomassa do sorgo é bastante favorável para produção de etanol celulósico e de grande interesse para o setor sucroenergético, por apresentar altos valores de celulose (30-35%) e hemicelulose (25-30%), associados a baixos valores de lignina (4-7%) (Simeone et al., 2018a). Essa variação no teor de lignina permite utilizar a biomassa com maiores teores de lignina para cogeração de energia através da queima em caldeiras das indústrias e usinas de etanol, apresentando alto poder calorífico, aproximadamente 4.000 Kcal.kg⁻¹ de MS em base seca ou 1.800 Kcal.kg⁻¹ com 50% de umidade (Simeone et al., 2018b). E ainda genótipos com baixo valor de lignina podem ser utilizados para produção de etanol de segunda geração, biogás e até mesmo na alimentação animal (Almeida et al., 2019a; Parrella et al., 2018; Molaverdi et al., 2013).

O programa de melhoramento da Embrapa desenvolve híbridos de sorgo biomassa sensíveis ao fotoperíodo com nervura marrom (brown midrib – *bmr6*) para atender a demanda por biomassa de qualidade para produção de etanol de segunda geração, biogás e alimentação animal (Figura 2c), ou seja, com menores teores de lignina. Desta forma, foi introduzido o alelo mutante *bmr6*, através de um programa de retrocruzamento assistido por marcadores moleculares, em um conjunto de linhagens R, A e B, parentais dos melhores híbridos de sorgo biomassa convencionais do programa (Silva et al., 2020). Os híbridos de sorgo biomassa com nervura marrom gerados apresentaram alta produção de massa seca, em torno de 30 t.ha⁻¹, mas com alta eficiência na conversão em etanol celulósico, biogás e digestibilidade da fibra (Parrella et al., 2018).

Simeone et al. (2018a) analisaram a composição química de três genótipos de sorgo biomassa, sendo dois genótipos de sorgo biomassa com nervura marrom (*bmr6*) (201552B001 e 201552B005) e um híbrido biomassa convencional (BRS 716), com nervura branca (Figura 3), com vista ao potencial uso dessa biomassa para produção de etanol celulósico. Os genótipos foram analisados quanto aos teores de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), celulose, hemicelulose, lignina (LDA), cinzas, açúcares: xilose e arabinose, razão siringil/guaiacil (S/G). Os resultados mostraram que os dois genótipos de sorgo biomassa com nervura marrom apresentaram valores significativamente inferiores de lignina (4%) e superiores de hemicelulose em comparação ao genótipo normal BRS 716 (7%). Um dos genótipos com nervura marrom (201552B001) apresentou maior razão S/G, característica mais propícia para fontes de biomassa com potencial para uso na obtenção de etanol de segunda geração (Simeone et al., 2018a). Estes resultados confirmam o potencial do sorgo biomassa e sua versatilidade na síntese de bioenergia.



Fotos: Maria Lúcia Ferreira Simeone

Figura 3. Sorgo biomassa tradicional – BRS 716 (A), e sorgo biomassa com o gene de nervura marrom (*bmr6bmr6*), genótipo 201552B001 (B) e 201552B005 (C), mostrando variabilidade genética na coloração.

Almeida et al. (2019b), avaliando o rendimento de etanol celulósico por hectare, compararam cinco híbridos de sorgo biomassa. Dentre os genótipos avaliados, dois híbridos de sorgo biomassa com nervura marrom (*bm6*) foram testados comparativamente a três híbridos de sorgo biomassa normais de nervura branca. Entre os caracteres agrônômicos, constatou-se diferença na produtividade, sendo o híbrido convencional BRS716 o mais produtivo, com produção de massa verde (PMV) de 98,41 t.ha⁻¹ e produção de massa seca (PMS) de 33 t.ha⁻¹. O híbrido de sorgo biomassa de nervura

marrom (2015B002) também apresentou valores considerados altos, com um PMV de 81,03 t.ha⁻¹ (Almeida et al., 2019b). Vale salientar que estes híbridos apresentam alta produtividade de massa fresca e seca com baixos teores lignina na sua composição, o que aumenta a produtividade e eficiência na produção de etanol celulósico.

Em relação à composição lignocelulósica da biomassa *in natura*, os híbridos de nervura marrom *bmr6* se destacaram, apresentando teores de lignina significativamente menores (4,63%) em relação aos híbridos convencionais (7,15%). Verificou-se que os pré-tratamentos na produção do etanol celulósico foram eficientes na remoção de lignina, constatando teores próximo de zero para os genótipos 2015B002 (Figura 4) e 2015B003, que apresentam o gene de nervura marrom (Almeida et al., 2019b).



Fotos: Maria Lúcia Ferreira Simeone

Figura 4. Aspecto da biomassa de sorgo 201556B002 *in natura* A, após pré-tratamento ácido B e ácido/básico C, durante o processo de produção do etanol celulósico.

A lignina é um composto polifenólico que interfere de maneira negativa no processo de sacarificação, uma vez que dificulta a ação das enzimas ao complexo celulósico. A produção de bioetanol de segunda geração para os híbridos avaliados por Almeida et al. (2019a) variou entre 6.612 e 11.838 litros por hectare, para um ciclo de 180 dias. Os genótipos de nervura marrom apresentaram melhor rendimento de hidrólise, para os dois tipos de sacarificação utilizados, quando comparados aos genótipos normais de nervura branca (Almeida et al., 2019a).

Um dos entraves encontrados para a utilização do sorgo biomassa é o alto custo para transportar a matéria-prima do campo até a indústria/usina. Uma das formas de ampliar o uso do sorgo biomassa para geração de energia é utilizá-lo via os processos de densificação da biomassa para a produção

de *pellets* e briquetes. Esses processos compactam a biomassa, aumentando assim sua densidade, resultando em produtos de tamanho e forma uniforme, facilitando o uso e transporte.

Os *pellets* obtidos a partir de sorgo biomassa BRS 716 (Figura 5) apresentaram as características mínimas exigidas pela norma DIN EN 14961-6 e adequaram-se a todas as especificações da norma europeia de comercialização para *pellets* de produtos não madeireiros (Simeone et al., 2018b). Esses resultados demonstram o grande potencial do sorgo biomassa como uma cultura a ser integrada à cadeia de fornecimento de biomassa para geração de energia (Simeone et al., 2018b; Ferreira et al., 2019).



Foto: Maria Lúcia Ferreira Simeone

Figura 5. *Pellets* de sorgo biomassa BRS 716.

O cultivo do sorgo para a produção de biogás também é uma opção para a obtenção de bioenergia e tem sido utilizado principalmente na Europa central (Wannasek et al., 2017). No Brasil, três diferentes cultivares de sorgo, sendo dois genótipos com nervura marrom (*bmr* – brown-midrib) e um genótipo de nervura branca convencional, foram analisados quanto ao potencial de produção de biogás e metanogênico. Todas as amostras analisadas obtiveram concentração de metano superior a 50%, atingindo a produção de metano de $242 \text{ L}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kgsv}^{-1}$ e de biogás $398,7 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ de biomassa (Tabela 1). Esses valores são bastante expressivos, mostrando-se uma cultura promissora para esta tecnologia, principalmente associados aos altos índices de produtividade de biomassa.

O potencial do sorgo biomassa para a produção de biogás poderá

ser otimizado em função da seleção de materiais e da época de colheita adequada, com vistas a maximizar a produção de biogás.

Tabela 1. Potencial de produção de biogás e metano a partir de diferentes genótipos de sorgo.

Amostra	ST (g/kg)	SV (g/kg)	SF (g/kg)	Produção de biogás (LNbiogás. kg.sv ⁻¹)	Produção de metano (LNCH ₄ . kg.sv ⁻¹)	m ³ de biogás.ton ⁻¹
bmr03	913,9	942,4	57,6	449	237	386,7
bmr18	915,9	936,6	63,4	431	223	369,7
BRS 716	924,4	958,5	41,5	450	242	398,7

ST: sólidos totais, SV: sólidos voláteis e SF: sólidos fixos.

Dessa forma, considerando os altos níveis de produtividade e qualidade da biomassa, bem como aspectos fitotécnicos da cultura como ciclo curto (4-6 meses), semeadura, manejo e colheita mecanizados, os sorgos sacarino e biomassa apresentam-se como culturas promissoras no fornecimento de matéria-prima de qualidade para geração de energia renovável no Brasil e no mundo.

Referências

ALMEIDA, L. G. F.; PARRELLA R, A.; SIMEONE, M. L. F.; RIBEIRO, P. C. O.; BARBOSA, G. M. P.; BRITO, P. L.; COSTA, A. S. V.; SANTOS, A. S. Characterization of cell wall polysaccharides and cellulosic ethanol potential in genotypes of sorghum biomass. **International Journal of Development Research**, v. 9, p. 26810-26820, 2019a.

ALMEIDA, L. G. F.; PARRELLA, R. A.; SIMEONE, M. L. F.; RIBEIRO, P. C. O.; SANTOS, A. S.; COSTA, A. S. V.; GUIMARÃES, A. G.; SCHAFFERT, R. E. Composition and growth of sorghum biomass genotypes for ethanol production. **Biomass & Bioenergy**, v. 122, p. 343-348, 2019b.

BALAT, M.; BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, n. 11, p. 2273-2282, 2009.

CASTRO, F. M. R.; BRUZI, A. T.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; LOMBARDI, G. M. R.; ALBUQUERQUE, C. J. A.; LOPES, M. Agronomic and energetic potential of biomass sorghum genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 1862-1873, 2015.

DURÃES, N. N. L.; NUNES, J. A. R.; BRUZI, A. T.; LOMBARDI, G. M. R.; FAGUNDES, T. G.; PARRELLA, N. N. L. D.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Heterosis for ethanol yield and yield components in sweet sorghum. **Sugar Tech**, v. 23, n. 2, p. 360-368, 2021.

FERNANDES, G.; BRAGA, T. G.; FISCHER, J.; PARRELLA, R. A. C.; RESENDE, M. M. de; CARDOSO, V. L. Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. **Renewable Energy**, v. 71, p. 518-524, 2014.

FERREIRA, I. R.; SANTOS, R.; CASTRO, R.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F.; SANTOS, C. P. S.; COSTA, S. E. L.; MAIRINCK, K. Sorghum (*Sorghum bicolor*) pellet production and characterization. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 3, e20171001, 2019.

KIM, M.; DAY, D. F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, n. 7, p. 803-807, 2011.

MARTINS, A. M.; PARRELLA, R. A. C.; LOPES, A. C.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, N. N. L. D.; NEVES, W. S.; SILVA, A. P. C. M. Período de utilização industrial de cultivares de sorgo sacarino visando a produção de etanol. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.16, n. 2, p. 217-231, 2017.

LOMBARDI, G. M. R.; NUNES, J. A. R.; PARRELLA, R. A. C.; TEIXEIRA, D. H. L.; BRUZI, A. T.; DURÃES, N. N. L.; FAGUNDES, T. G. Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research**, v. 14, n. 4, p. 16392-16402, 2015.

MOLAVERDI, M.; KARIMI, K.; KHANAHMADI, M.; GOSHADROU, A. Enhanced sweet sorghum stalk to ethanol by fungus *Mucor indicus* using solid state fermentation followed by simultaneous saccharification and fermentation. **Industrial Crops Production**, v. 49, p. 580-585, 2013.

MURRAY, S. C.; ROONEY, W. L.; HAMBLIN, M. T.; MITCHELL, S. E.; KRESOVICH, S. Sweet sorghum genetic diversity and association mapping for brix and height. **The Plant Genome**, v. 2, n. 1, p. 48-62, 2009.

MURRAY, S. C.; ROONEY, W. L.; MITCHELL, S. E.; SHARMA, A.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E.; KRESOVICH, S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: II. QTL for stem and leaf structural carbohydrates. **Crop Science**, v. 48, n. 6, p. 2180-2193, 2008a.

MURRAY, S. C.; SHARM, A.; ROONEY, W. L.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E.; MITCHELL, S. E.; KRESOVICH, S. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I. QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates. **Crop Science**, v. 48, n. 6, p. 2165-2179, 2008b.

PACHECO, T. F.; MENDES, T. D.; GONÇALVES, S. B.; PARRELLA, R. A. da C.; MACHADO, C. M. M. Avaliação da fermentação de caldo de sorgo sacarino empregando leveduras comerciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA - COBEQ, 20.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15., 2014, Florianópolis - SC. [**Anais...**]. Florianópolis: UFSC, 2014.

PARRELLA, R. A. da C.; SCHAFFERT, R. E.; MENEZES, C. B. de; RODRIGUES, J. A. S.; MAGALHÃES, J. V.; DAMASCENO, C. M. B.; SILVA, D. D. da; MENDES, S. M. Improving sorghum cultivation in South America. In: ROONEY, W. (ed.). **Achieving sustainable cultivation of sorghum: sorghum utilization around the world**. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. v. 2, p. 159-192.

PFEIFFER, T. W.; BITZER, M. J.; TOY, J. J.; PEDERSEN, J. F. Heterosis in Sweet sorghum and selection of a new sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. **Crop Science**, v. 50, n. 5, p. 1788-1794, 2010.

QUINBY, J. R. **Sorghum improvement and the genetics of growth**. Texas: College Station, 1974. 108 p.

RIBEIRO, P. C. O.; MARÇAL, T. S.; OLIVEIRA, I. C. M.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, A. B.; PARRELLA, R. A. C. Insight into genetic potential of male sterile sweet sorghum A-lines for agroindustrial traits using tester R-lines. **Industrial Crops and Products**, v. 153, p. 112577-112585, 2020.

RITTER, K. B.; JORDAN, D. R.; CHAPMAN, S. C.; GODWIN, I. D.; MACE, E. S.; LYNNE, C. Identification of QTL for sugar-related traits in a sweet 3 grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) recombinant inbred population. **Molecular Breeding**, v. 22, p. 367-384, 2008.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 39, n. 2, p. 397-400, 1999.

ROONEY, W. L.; BLUMENTHAL, J.; BEAN, B.; MULLET, D. J. E. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 1, n. 2, p. 147-157, 2007.

SANDESH, K.; UJWAL, P. Trends and perspectives of liquid biofuel: process and industrial viability. **Energy Conversion and Management**, v. 10, 100075, 2021.

SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Planejamento industrial. In: MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. (ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol: Sistema BRS1GTecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 118 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 139).

SILVA, M. J. da; DAMASCENO, C. M. B.; GUIMARÃES, C. T.; PINTO, M. de O.; BARROS, B. de A.; CARNEIRO, J. E. de S.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. da C. Introgression of the bmr6 allele in biomass sorghum lines for bioenergy production. **Euphytica**, v. 216, article 95, 2020.

SIMEONE, M. L. F.; OLIVEIRA, P. A. de; CANUTO, K. M.; PARRELLA, R. A. da C.; DAMASCENO, C. M. B.; SCHAFFERT, R. E. Caracterização de genótipos de sorgo biomassa para bioenergia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 22.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 17., 2018, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2018a.

SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. C.; MAY, A.; SCHAFFERT, R. E. Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 2, p. 1682-1695, 2018b.

SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Embrapa Agrobiologia. Circular Técnica, 27).

SOUZA, R. S.; PARRELLA, R. A. C.; SOUZA, V. F.; PARRELLA, N. N. L. D. Maturation curves of sweet sorghum genotypes. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 46-56, 2016.

ZHANG, L.-M.; LENG, C. Y.; LUO, H.; WU, X. Y.; LIU, Z. Q.; ZHANG, Y.; ZHANG, H.; XIA, Y.; SHANG, L.; KIU, C.; HAO, D.; ZHOU, Y.; CHU, C.; CAI, H.; JING, H. Sweet sorghum originated through selection of Dry, a plant-specific NAC transcription factor gene. **Plant Cell**, v. 30, p. 2286-2307, 2018.

WANNASEK, L.; ORTNER, M.; AMON, B.; AMON, T. Sorghum, a sustainable feedstock for biogas production? Impact of climate, variety and harvesting time on maturity and biomass yield research paper. **Biomass and Bioenergy**, v. 106, p. 137-145, 2017.

Capítulo 11

Melhoramento genético do sorgo para o semiárido brasileiro

José Nildo Tabosa

Alexandre Hugo César Barros

Ana Rita de Moraes Brandão Brito

Aluizio Low Simões

Josimar Bento Simplício

Eric Xavier de Carvalho

José Alves Tavares

José Avelino Santos Rodrigues

Marta Maria Amâncio do Nascimento

José Geraldo Eugênio de França

Venézio Felipe dos Santos

Cícero Beserra de Menezes

José Jorge Tavares Filho

Introdução

O semiárido brasileiro (SAB) apresenta condições climáticas particulares, caracterizadas por um período seco, que se estende por seis a oito meses do ano. As precipitações pluviiais são irregulares e situam-se na faixa de 400 a 800 mm, chegando a atingir, em muitas áreas, valores abaixo destes (Araújo Filho et al., 2019). As concentrações de chuvas ocorrem no primeiro quadrimestre do ano, mas na maioria das vezes intercaladas de secas severas.

Esse semiárido abrange uma área de 1.128.697 km², em 1.262 municípios (IBGE, 2017), englobando partes de nove estados da região Nordeste e um estado da região Sudeste, Minas Gerais. Nessa delimitação foram incluídos dois municípios do estado do Maranhão (Araioses e Timon), que não figuravam antes de 2017, de acordo com o IBGE (2019) e com a nova delimitação do SAB, segundo o Ministério de Integração Nacional e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – Diretoria de Planejamento e Articulação de políticas (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2017).

A abrangência e a importância socioeconômica da região semiárida demandam estudos sistemáticos e interdisciplinares, no sentido de disponibilização de tecnologias adaptadas ao local. Nesse âmbito, o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) se enquadra no elenco de alternativas para a produção de grãos e biomassa de qualidade, para atender a demandas como forragem, produção de silagem e/ou como alternativa na produção de biocombustível. Apresentando características xerofílicas, além de outros mecanismos que conferem tolerância à seca e adaptação a diferentes tipos climáticos, o sorgo vem ocupando área de cultivo na região.

De acordo com dados do IBGE, os números de municípios por estado, com registro de área colhida na safra de 2019, são: Piauí – 06; Ceará – 10; Rio Grande do Norte – 27; Pernambuco – 28; Alagoas – 3; Sergipe – 3; Bahia – 46; e Minas Gerais – 38 (IBGE, 2019).

O intervalo entre os anos 2012 e 2018 ficou caracterizado como o maior período de seca sequencial dos últimos 200 anos, quando comparado com as ocorrências das secas que antecederam, ficando também esse espaço identificado como prenúncio de mudanças climáticas (Instituto Nacional de Meteorologia, 2021).

A título de comparação, a área colhida de milho, em 2019, apresentou resultados de produtividade bem abaixo da média regional (2.900 kg/ha) nos municípios localizados exclusivamente no semiárido. Esses níveis de produtividade podem ser considerados irrisórios nessas áreas semiáridas de sequeiro, principalmente, nos estados do Rio Grande do Norte, da Paraíba, do Ceará, de Alagoas e de Pernambuco, onde foram registrados valores de 385 a 1.924 kg/ha, nesse ano de 2019 (IBGE, 2019). A excessão é o estado de Sergipe, onde na sua porção semiárida ocorre uma faixa de solos profundos com adequada retenção de umidade e aptidão plena para a cultura do milho, que soma em torno de 120 a 140 mil hectares. Nessas áreas, os níveis de produtividade obtidos em 2019 foram de cerca de 5.000 kg por hectare (IBGE, 2019). Assim, nas áreas onde as precipitações não chegam a atender as exigências (dotação hídrica) do cultivo do milho o sorgo poderá ser uma alternativa e apresentar adequação e exequibilidade quanto ao comportamento produtivo, reduzindo substancialmente a frustração de safras.

O potencial do sorgo para o semiárido e as diferentes aptidões e utilizações das cultivares levam as instituições de pesquisa, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa e o Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, a seguirem em constante estudo sob os diferentes

aspectos de produção e aproveitamento. Essas atividades são consideradas importantes para o desenvolvimento de novas cultivares, cada vez mais produtivas, no atendimento à demanda da agropecuária.

Como objeto do segmento melhoramento genético do sorgo, a procura de novas cultivares adaptadas a diferentes ambientes agroecológicos é a base mais importante dessa atividade, principalmente as de ciclo precoce. Além disso, há foco na adaptabilidade, direcionado aos fatores ambientais adversos como estresse hídrico, salinidade do solo e temperaturas elevadas.

Existem dois aspectos de grande relevância quanto ao melhoramento do sorgo em face da tolerância às condições físicas do ambiente. O primeiro é respaldado no desenvolvimento de materiais genéticos tolerantes às flutuações de curta duração das condições ambientais. O outro é pertinente à geração de genótipos de restrita adaptação e que se pretende introduzir em locais onde as condições ambientais são limitantes por adversidades naturais.

Mesmo diante da disponibilidade de modernas ferramentas biotecnológicas, cultura de tecidos, marcadores moleculares e outras estratégias que viabilizem a obtenção de novos materiais, é importante e imprescindível se recorrer também ao uso do melhoramento clássico, em que a seleção de genótipos será sempre fundamental para a obtenção de materiais genéticos superiores.

O presente capítulo segue abordando o potencial do sorgo, sobretudo na manutenção estratégica de germoplasma e possibilidades de aproveitamento destes nas suas aptidões, além de particularidades e possibilidades do melhoramento genético, favorecendo a disponibilização de materiais cada vez mais apropriados e adaptados às condições mencionadas.

Por fim, a importância das cultivares recomendadas (de diferentes naturezas e de tipos de sorgo nos multivariados ambientes da região), que foram desenvolvidas pelo IPA e pela Embrapa, é relatada no decorrer do capítulo. São mencionadas, além da Embrapa e do IPA, diferentes instituições de ensino e pesquisa da região como a UFC - Universidade Federal do Ceará e a UFERSA – Universidade Federal Rural do Semiárido, além de outras, que vêm desenvolvendo atividades produtivas a partir dessas cultivares e de outras desenvolvidas em épocas anteriores.

Importância e Utilização de Cultivares de Sorgo – Tipos Cultivados e Uso Potencial no Semiárido

De acordo com a natureza da exploração, são relatados cinco tipos de sorgo: granífero, sacarino, forrageiro, vassoura e biomassa.

O primeiro tipo inclui plantas de porte baixo e de porte médio, adaptadas à colheita mecanizada (colheita realizada com máquina automotrizes colhendo exclusivamente o grão, que é o produto final desse tipo de exploração). Ainda como forrageiro existe um tipo herbáceo denominado de sorgo sudão ou capim sudão, que é de ciclo precoce e pode ser utilizado como pastejo e na confecção de feno (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf). Derivações do grupo de sorgo granífero são também denominadas de sorgo de duplo propósito ou de dupla finalidade, como exemplo, o sorgo granífero, de porte baixo e porte médio, que tanto pode ser explorado para colheita do grão seco, quanto para a colheita da planta inteira para confecção de silagem (com grãos moles na fase leitosa/pastosa) ou mesmo o sorgo de colmo sacarino que pode ser utilizado como forrageiro ou para exploração de etanol ou açúcar.

O segundo tipo inclui plantas de porte alto, apropriadas para produção de silagem e/ou como alternativa para produção de açúcar e álcool. O sorgo forrageiro é utilizado como complemento alimentar, na alimentação de ruminantes, na forma de corte, silagem e fenação, podendo ser também utilizado na forma de cobertura morta, antecedendo o cultivo de grandes culturas, como soja e milho.

Além desses, ressalta-se o sorgo do tipo vassoura que é explorado para confecção do produto que o denomina. É uma atividade artesanal e encontrada em muitas regiões do Brasil e de países da Ásia. Esse tipo não é explorado no semiárido, todavia poderá apresentar oportunamente potencial de utilização. Por fim, os tipos do grupo de biomassa/energia, que são destinados à produção de energia. Apresentam poder calorífico similar ao da cana, do eucalipto e do capim elefante. Geralmente são materiais de porte alto, tardios, de baixo valor nutricional e ricos em celulose e lignina (Tabosa et al., 2019). Também podem ter utilização forrageira inadequadamente em regiões onde existe escassez de volumosos.

Desses mencionados grupos, o sorgo granífero é o que apresenta maior expressão econômica e está entre os cinco cereais mais cultivados em todo o globo, ficando atrás de trigo, milho, arroz e cevada (FAO, 2019).

O Sorgo Granífero

Esse tipo de sorgo é utilizado como importante componente da alimentação animal, nos Estados Unidos, na Austrália e em países da América do Sul, com extensão para o semiárido brasileiro. Além disso, eventualmente atende também como forragem ou cobertura de solo (Rodrigues et al., 2015).

Nessa região, na série histórica de 2011/2019, a área colhida de sorgo foi bem variada em face também de ocorrências de anos secos em sua grande maioria. No período entre 2012 e 2018 aconteceu na região a maior seca sequencial dos últimos 200 anos, quando comparada com as ocorrências das secas históricas anteriores. Além disso, esses anos de seca severa também ficaram configurados como prenúncio de mudanças climáticas (Instituto Nacional de Meteorologia, 2021).

Esse fato culminou com frustrações sucessivas de safras da grande maioria das culturas. No decorrer dessa série histórica mencionada, a área colhida de sorgo granífero (exclusivamente na região semiárida) variou de 104 mil hectares em 2011 (ano hídrico regular e de adequada distribuição de chuvas) até 28 mil hectares em 2018. Esses valores correpondem a um percentual de 13,8 a 3,9% da área total colhida de sorgo no Brasil (Tabela 1).

Na Tabela 2 pode ser observada a posição da cultura do sorgo granífero nos principais estados produtores, notadamente nas áreas exclusivamente pertencentes à porção semiárida, no biênio 2018 e 2019. Esses resultados podem ser considerados de baixa magnitude, quando comparados com as áreas colhidas de sorgo de outras regiões, principalmente no período de seca entre 2012 e 2018. Todavia, é importante mencionar o incremento de rendimento obtido no semiárido mineiro quando comparado com os rendimentos representados pela média nacional. Provavelmente isso se deve a novas cultivares zoneadas. Antecedendo a esse período adverso mencionado existem registros de áreas colhidas de sorgo da ordem de mais de 100 mil hectares nessa mesma região (IBGE, 2019).

Tabela 1. Área colhida (ha) de sorgo granífero exclusivamente no semiárido brasileiro (SAB*) em cada Unidade Federativa de acordo com o IBGE (2019) e com a Nota Técnica nº 023/2017. DPLAN/CGEP.

UF	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
MA	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PI	2210	-	-	-	1.500	-	-	500	3.065
CE	2.100	600	580	690	400	-	-	-	400
RN	8.087	1.001	2.206	912	162	490	769	435	425
PB	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE	2.761	30	-	220	350	-	344	309	2.287
AL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	362	-	-	-	-	--	-	-
BA	88.880	41.371	84.570	86.236	74.948	41.415	24.953	28.134	28.781
MG	2.890	2.858	1.817	2.904	1.569	2.140	1.249	1.137	1.215
SAB**	104.948	46.222	89.173	88.058	78.929	44.045	27.398	30.565	36.183
BR	757.410	687.952	792.838	840.093	732.281	558.189	744.571	793.575	818.301
SAB/ BR(%)	13,8	6,7	11,2	10,5	10,8	7,9	3,4	3,9	4,4

* Número de municípios no SAB por Estado: MA – 02; PI – 185; CE – 175; RN – 147; PB – 194; PE – 123; AL – 38; SE – 29; BA – 278; MG – 91.

** Número de municípios com registro de área cultivada de sorgo por Estado incluídos no SAB: MA – nenhum; PI - 06; CE – 10; RN – 27; PB – nenhum; PE – 28; AL – 03; SE – 03 BA – 46; MG – 38.

Tabela 2. Área colhida, produção obtida e rendimento do sorgo granífero na porção semiárida dos principais estados produtores localizados no semiárido brasileiro, no biênio 2018 e 2019.

UF	2018			2019		
	Área colhida (ha)	Produção obtida (t)	Rendimento (kg/ha)	Área colhida (ha)	Produção obtida (t)	Rendimento (kg/ha)
PI	500	900	1.800	3.065	6.366	2.077
BA	28.134	45.014	1.600	28.781	48.639	1.690
MG	1.137	3.638	3.200	1.215	4.070	3.350
PE	410	212	517	2.545	2.264	889
RN	435	830	1.908	425	298	701
CE	-	-	-	400	1.120	2.800
BR	800.175	2.281.316	2.851	818.301	2.672.245	3.266

Fonte: IBGE (2019).

As cultivares objeto de uso nessa região compreendem materiais da Embrapa, cultivares de empresas privadas e também de empresas estaduais de pesquisa. A discriminação desses materiais constam nas portarias estaduais dos zoneamentos de risco climático para os estados da região (Brasil, 2021). Complementando, segundo dados relatados pela Associação Paulista dos Produtores de Sementes e Mudanças (APPS) e pelo Grupo Pró Sorgo, referentes à safra 2017/2018, a área cultivada com sorgo granífero, no Brasil, foi de 846.951 hectares e com sorgo forrageiro foi de 410.387 hectares. Nesse levantamento, não são levados em consideração os materiais varietais regionais, fato esse que iria incrementar a área de cultivo da cultura, principalmente na região (Associação Paulista de Produtores de Sementes, 2020).

Cultivares de Sorgo Forrageiro para Corte, Feno e Silagem

Não existe no Brasil, e nem por regiões, uma estatística oficial de sorgo forrageiro. O que está disponível nas estatísticas do IBGE/SIDRA, da Conab e da FAO correspondem ao sorgo granífero. Através da APPS e do Grupo Pró-Sorgo (Associação Paulista dos Produtores de Sementes e Mudanças, 2020), estimou-se a provável área de sorgo forrageiro cultivada, em função da quantidade de sementes comercializadas: para cada 8 kg comercializados de semente, computa-se um hectare plantado. Esse ponto remonta sobre cultivares comerciais e com controle fiscal. Em contrapartida, no semiárido, grande parte de “sementes” produzidas em fazendas não são incluídas nesse tipo de contabilidade.

Com relação à produção de biomassa, em média poderá ser obtido, de um hectare, um valor de 15 t de matéria seca. Esse quantitativo atende às necessidades de consumo em volumoso de oito unidades animais (1 U.A. = 450 kg de peso vivo), consumindo 2,5% ao dia do seu peso vivo em matéria seca, por um período de 150 dias, equivalente a cinco meses, período estival do ano. No caso de caprinos ou de ovinos, 40 animais poderão ser atendidos nessas mesmas condições. Quanto aos diferentes tipos de sorgo forrageiro, são cultivadas na região principalmente as cultivares de sorgo forrageiro tradicionais, de porte elevado e cultivares de porte médio, com dupla aptidão (Figura 1).

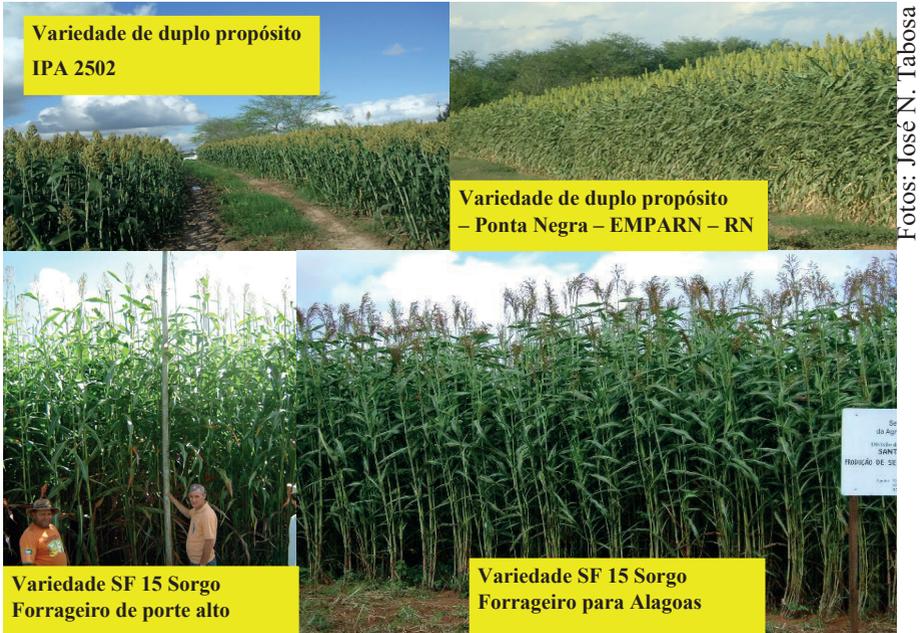


Figura 1. Variedades de sorgo: de duplo propósito e forrageiro de porte alto.

Na Tabela 3 são visualizados os comportamentos produtivos e características agrônomicas de variedades de sorgo (cultivares do IPA) recomendadas para a região. A variedade IPA 467-4-2 apresenta aptidão para silagem e possui o colmo de natureza sacarina; a variedade IPA SF 25 apresenta colmo seco e é de ciclo precoce; a variedade SF 11 é de aptidão para silagem e é considerada, dentre as demais, a mais tolerante ao estresse hídrico (Montalvan; Faria, 1999); e a variedade SF 15 é apropriada para silagem e foi desenvolvida pelo IPA, conjuntamente com a Seagri- AL (Secretaria de Agricultura de Alagoas).

Tabela 3. Resultados de produção de matéria verde e seca, % de matéria seca e altura de planta das variedades de sorgo forrageiro, sob diferentes condições ambientes do semiárido brasileiro (estresse hídrico, irrigação, temperaturas elevadas, solos salinizados e ácidos) - 2007/2008/2009.

Variedade/Local	Variáveis observadas			
	Matéria verde (t/ha ⁻¹)	Matéria seca (t/ha ⁻¹)	Matéria seca (%)	Altura de planta (cm)
IPA 467-4-2 (estresse)	24,2	6,9	28	320
IPA SF 25 (estresse)	26,2	6,0	23	300
IPA SF 25 (250-350 mm)	46,5	14,4	31	410
IPA 467-4-2 (250-350 mm)	25,7	8,3	32	260
IPA SF 11 (250-350 mm)	45,9	12,8	28	370
SF 15 (250-350 mm)	42,3	14,8	34	460
SF 15 (250-350 mm)	50,4	14,6	29	400
IPA SF 11 (250-350 mm)	39,8	11,2	28	420
IPA SF 25 (250-350 mm)	26,6	10,8	40	380
IPA SF 11 (250-350 mm)	48,9	16,6	34	360
IPA 467-2-2 (Sertão)	31,0	9,2	30	310
IPA 467-4-2 (Agreste)	32,0	10,2	32	300
SF 15 (irrigado)	70,8	21,9	31	380

Com as exigências do mercado em qualidade e em preço competitivo, há uma interferência direta no aumento do profissionalismo da pecuária de leite e de corte de uma forma geral. O milho, na qualidade de componente principal na alimentação animal, é de difícil acesso e utilização em face de elevados preços do mercado, principalmente no período seco do ano, nas regiões semiáridas. Com isso, o sorgo surge, então, como a principal alternativa ao milho na dieta de ingredientes forrageiros.

A Recomendação da Cultivar de Sorgo Forrageiro

As cultivares de sorgo denominadas forrageiras, com ciclos mais longos e alturas superiores a 300 cm, tardias e de elevado potencial forrageiro, podem ser subdivididas da seguinte forma:

- a) Cultivares com alta produtividade de biomassa e com reduzida

produção de grãos e de açúcares solúveis - são materiais de utilização para silagem. No geral esses materiais produzem uma silagem de baixa qualidade, com poucos grãos e são de reduzida digestibilidade.

b) Cultivares com baixa produção de grãos, colmo suculento e sacarino e altura próxima aos 300 cm - são de natureza sacarina, o que possibilita também a sua industrialização para a produção de etanol. Os colmos fornecem um caldo rico em açúcares fermentescíveis e os grãos, pelo processo de sacarificação, podem transformar seu alto teor de amido em significativas quantidades de açúcares. Esses materiais são também utilizados na produção de silagem.

c) Cultivares com aptidão para corte e fenação, podendo ser também utilizadas em pastejo: sorgo sudão ou capim sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) e seus híbridos interespecíficos com o *Sorghum bicolor* - produzem silagem de qualidade inferior, em face do elevado teor de água e baixo percentual de grãos, na planta, por ocasião do ponto de colheita.

Cultivares de panícula com muitos grãos e altura de até 300 cm - são consideradas silageiras de qualidade elevada, em face da alta relação grãos/massa verde, apresentam elevado valor nutricional e elevada digestibilidade de fibras.

Na Tabela 4 são apresentadas cultivares (forrageiras, de dupla finalidade e graníferas) adaptadas para produção de silagem, feno e outros usos que são desenvolvidas e comercializadas pelas várias instituições públicas e privadas.

O Sorgo Sacarino

O sorgo sacarino, no universo dos biocombustíveis, hoje se apresenta como mais uma alternativa de uso, além dos combustíveis fósseis. A demanda mundial por biocombustíveis favoreceu a sua retomada de pesquisas para a produção do etanol. Esse tipo de sorgo, apresenta como vantagem o ciclo curto, permitindo sua utilização nos períodos de entressafra da cana-de-açúcar, ou mesmo o seu cultivo no semiárido, sob condições irrigadas (em substituição à cana-de-açúcar, que representa exigência hídrica cerca de nove vezes a dotação hídrica do sorgo) ou mesmo de sequeiro, em áreas espacialmente zoneadas. Além do ciclo curto, de cerca de 130 dias, apresenta vantagens por permitir a mecanização total de sua produção e demandar menos irrigação do que a cultura do milho, sendo mais adaptável às áreas secas.

Tabela 4. Cultivares de sorgo forrageiro (H - híbrido, HBM - híbrido biomassa, V - variedade, VCF - variedade para corte e feno, VSF - variedade sacarina de uso forrageiro, VDP - variedade duplo propósito ou dupla finalidade) para silagem e feno ou corte, e grão e forragem).

Corte/silagem dupla finalidade	Empresa	Corte/silagem dupla finalidade	Empresa
BRS 655 – H	Embrapa	SF 15 - V	IPA
BRS 658 – H	Embrapa	SUDAN 4202 - VCF	IPA/Embrapa
Ponta Negra - VDP	Embrapa/Emparn	BRS 506 – V	Embrapa
BRS 511 - VSF	Embrapa	Podium – H	Biomatrix
Volumax – H	Agroceres	20XB01 – H	Semeali
AG2005E – H	Agroceres	Topsilo – H	Semeali
Chopper – H	Nuseed	AGN 10S20 – H	Agromen
Dominator – H	Nuseed	ADV 2499 – H	Advanta
Maxisilo – H	Nuseed	BRS 716 – HBM	Embrapa
Qualysilo – H	Nuseed	Agri-002E- HBM	Agricomseeds
BRS 508 - VSF	Embrapa	AG 2002 – H	Agroceres
BRS 509 - VSF	Embrapa	20XB01 – H	Semeali
IPA 467-4-2 – V	IPA	IPA SF 11 – V	IPA
IPA 1011 – VDP	IPA	IPA 2502 – VDP	IPA

Adaptado de relatórios de levantamento da Associação Paulista dos Produtores de Sementes e Mudanças (2020) e dos sites das empresas de sementes e empresas de pesquisas regionais.

Nas áreas marginais, onde a cana não é cultivada, o sorgo sacarino poderá se constituir em alternativa viável. Outra vantagem é a geração de renda à agricultura familiar, pois os pequenos agricultores podem utilizar o sorgo sacarino em mini e microdestilarias, para produção de etanol ou aguardente, em regiões com baixo índice de chuvas e solos ácidos, onde a cana não se desenvolve bem.

O cultivo do sorgo sacarino pode ser uma alternativa técnica e economicamente viável para o fornecimento da matéria-prima a microdestilarias, evitando o corte antecipado da cana-de-açúcar. Assim, essa cultura poderá se tornar uma alternativa para produção de álcool em áreas de escassez e de distribuição errática das chuvas.

Outra utilização do sorgo sacarino é seu uso forrageiro, como os

materiais da Embrapa BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511, além dos materiais do IPA 467 e SF 15.

Na Figura 2, pode ser observada uma área de sorgo sacarino, variedade IPA 467-4-2 (comercialmente utilizada como forrageira, cultivada sob irrigação e fertilizada orgânica e quimicamente, com produção de até 100 t/ha de biomassa) e IPA 2502, material de duplo propósito de colmo sacarino cultivado na região.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 2. Variedades de sorgo sacarino - cultivo no semiárido brasileiro.

Em primeiro plano, ressalta-se a importância de cultivares de sorgo de ciclo curto e médio, para produção intensiva de forragem sob condições de baixo suprimento hídrico. Na Figura 3 pode ser observado o contraste (porte e potencial produtivo) entre a cultivar de sorgo sacarino (estádio de grão pastoso) e o milho (grãos secos), sob condições adversas de suprimento hídrico em ambiente do semiárido.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 3. Sorgo variedade SF 15 x milho variedade catingueiro.

Outro ponto importante é a exploração de forragem de sorgo de colmo sacarino, com a ocupação imediata nos leitos das áreas em processo de secamento dos reservatórios (açudes e barragens) do semiárido, aproveitando a umidade remanescente. Uma vez implantado e com o consequente aprofundamento do sistema radicular, a cultura “escapa” da salinidade do solo concentrada na superfície. Nas Figuras 4 e 5, pode ser observado este fato no reservatório Açude do Saco, na unidade do IPA de Serra Talhada (localidade do sertão central de Pernambuco), em anos de severo estresse hídrico e em solo salinizado.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 4. Sorgo forrageiro/sacarino implantado na área seca do Açude do Saco, sertão central de Pernambuco - Serra Talhada-PE, 2015.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 5. Rebrota do sorgo sacarino/forrageiro SF 15 em área salinizada, no leito seco de açude em Serra Talhada-PE, 2016.

Outros aspectos ocorrentes nesses anos secos é a possibilidade limitada da irrigação com água comprometida pela salinidade, desde que se desenvolvam procedimentos de subsolagem, drenagem adequada e rotação de cultivo (sorgo-leguminosa-sorgo). Na Figura 6 abaixo pode ser observada uma lavoura de sorgo que foi implantada seguindo esse procedimento.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 6. Sorgo SF 15, fase juvenil, cultivado com água salinizada (C2S3), de poço às margens do Rio Moxotó, Ibimirim-PE, 2016.

Na Figura 7 pode ser observada a cultivar IPA 467 de colmo sacarino, destinada à produção de forragem. Nesse ponto destaca-se o elevado potencial

de biomassa, ressaltando-se o elevado porte da variedade.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 7. Vista parcial de área de sorgo sacarino IPA 467, de 5,0 m de altura, para produção de silagem. Cultivo de sequeiro no sertão alagoano, localidade de Pão de Açúcar, 2013.

Cultivares de Sorgo de Duplo Propósito e Sudanense em Áreas do Semiárido – Manejo Diversificado

Na Figura 8 abaixo pode ser observada no estágio de colheita para silagem a variedade BRS Ponta Negra, da Embrapa. Essa cultivar vem apresentando características adaptativas ao ambiente de cultivo irrigado no semiárido com água salinizada classificada como C2S3, originária de poço.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 8. Sorgo variedade Ponta Negra, fase de colheita, cultivado com água (C2S3) de poço, às margens do Rio Moxotó, Ibirimir-PE, 2016.

Nas Figuras 9 e 10 podem ser observadas áreas de cultivo de sorgo para produção de grãos e aproveitamento de restolho. No ponto de colheita do grão observa-se que o restolho continua verde, caracterizando o “stay green” da cultivar, que pode também ser explorada para silagem, desde que colhida na fase de grãos leitosos/pastosos. Essa cultivar considerada de duplo propósito poderá ainda ser utilizada para pastejo direto, visando a exploração do restolho, após a colheita dos grãos (Tabosa et al., 2013).



Fotos: José N. Tabosa

Figura 9. Área de sorgo granífero/duplo propósito – IPA 1011 seleção 2000. No detalhe: grãos secos e biomassa ainda verde. No caso vertente a exploração é para grãos, seguida do restolho e/ou feno. Caruaru-PE, 2011



Fotos: José N. Tabosa

Figura 10. Vista parcial de um campo de produção de grão e de restolho da variedade de sorgo IPA 1011.

O sorgo forrageiro tradicional é de porte alto, altura de planta superior a 3 m, ciclo de médio a tardio e elevada produção de forragem. Já o tipo forrageiro silageiro possui porte médio, ciclo precoce e altura média de 2,50 m, com panícula compacta e bem granada, que pode ser colhida na fase leitosa/pastosa, para uma silagem enriquecida, como pode ser observado na Figura 11.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 11. Vista parcial de uma área de sorgo forrageiro/silageiro tradicional, tardio e de porte alto – SF 15. No detalhe, o sorgo de porte baixo é o forrageiro precoce para silagem com grão enriquecido – IPA 2564. Agreste de Pernambuco, 2011.

Na Figura 12 pode ser visto uma área de sorgo forrageiro de duplo propósito, precoce, para colheita de silagem enriquecida com os grãos, na fase leitosa/pastosa.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 12. Vista parcial de uma área de sorgo forrageiro precoce de porte médio – IPA 2502. São José do Egito, Sertão de Pernambuco, 2010.

Na Figura 13 abaixo pode ser observado o comportamento da variedade de sorgo sudanense IPA Sudan 4202, em áreas salinizadas de leitos secos de reservatórios de água no sertão central de Pernambuco. A variedade em tela foi selecionada para produção de biomassa em ambientes adversos de solos salinizados conforme registros configurados na literatura (Feijão et al., 2011; Medeiros, 2021; Nóbrega, 2020; Oliveira, 2011; Tabosa et al., 2007). Esse material genético vem apresentado comprovadamente tolerância

a esse fator adverso sob investigação bioquímica e também em condições de campo, tanto em solos salinos quanto sob irrigação com água salinizada.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 13. Sorgo sudão, em área salinizada, do leito seco do Açude do Saco. Serra Talhada, Sertão de Pernambuco, 2001.

Essa mencionada variedade apresenta ciclo precoce porte médio e elevado valor nutritivo de forragem, podendo ser colhida a intervalos de 40-50 dias. A sua aptidão principal é para feno. Pode, oportunamente, ser utilizada também para silagem. Na Figura 14, uma visão parcial de cultivo dessa variedade para exploração de corte e de feno.



Fotos: José N. Tabosa

Figura 14. Vista parcial de uma área de sorgo sudão IPA 4202, para corte e feno. No detalhe: fase de colheita para feno com intenso perfilhamento e fase de florescimento. Agreste de Pernambuco, 2013.

Níveis Máximos de Produtividade Experimental de Biomassa e de Grãos das Cultivares Desenvolvidas pelo IPA e Embrapa para a Região Semiárida

Na Tabela 5, a seguir, podem ser observados valores máximos de produtividade de grãos, matéria verde e de matéria seca (obtidos de um ou mais cortes) sob irrigação, sequeiro e condições adversas de salinidade e de estresse hídrico. Esses registros foram obtidos a partir de cultivares do IPA desenvolvidas para a região e também de cultivares da Embrapa potencialmente produtivas, frutos dos programas de melhoramento em diversos anos a partir de 1979. É importante colocar que esses ganhos em rendimentos foram obtidos de forma crescente ao longo dos anos, independentemente das variações de ordem climática.

Tabela 5. Níveis máximos de produtividade de sorgo no semiárido brasileiro: grãos, biomassa, sob rebrota e cortes sucessivos. Com e sem irrigação.

Localidade/ ambiente	Ano	Cultivares avaliadas	Nível de produtividade Alcançado	Fonte
Serra Talhada: Sertão central de Pernambuco sob irrigação com água de salinidade C3S2.	2015	Forageira/ sacarina: SF 15 e Ponta Negra	SF 15 – 35,8 (t/ ha de MS) Ponta Negra – 33,9 (t/ha MS)	Tabosa et al. (2016)
Piranhas: semiárido de Alagoas sob condição irrigada com água C1S1, somatório de quatro cortes sucessivos.	2015	Forageiras/ sacarinas: SF 15, EP 17, BRS 508, BR 506 e Qualimax	SF15 – 198 t/ha de MV e 63,3 t/ ha de MS; EP 17 – 211 t/ha de MV e 69,3 t/ ha de MS	Simplicio et al. (2019)

Continua..

Tabela 5. Continuação

Localidade/ ambiente	Ano	Cultivares avaliadas	Nível de produtividade Alcançado	Fonte
Canindé do São Francisco: semiárido de Sergipe, sob condições irrigadas com água C1S1.	2008	Forageira/ sacarina: SF 15	194 t/ha de MV ^e 58 t/ha de MS	Tabosa et al. (2010)
Gararu: semiárido de Sergipe sob condição de sequeiro	1986	Forageira/ sacarina: 467-4-2	126 t/ha de MV ^e 50 t/ha de MS sob condição de sequeiro	Carvalho e Aragão (1989)
Upanema: semiárido do RN, sob irrigação de diferentes lâminas de água	2017	Forageiras/ sacarinas: SF 15 Ponta Negra BR 506 BRS 511 467-4-2	SF 15 – 58,2 e 25,6 P. N. – 48,0 e 21,9 BR 506 – 29,6 e 12,5 BRS 511 – 36,1 e 16,2 467-4-2 – 46,5 e 19,0 (de MV e MS em t/ha)	Costa (2017)
Sertânia: semiárido do sertão de PE, sob condição de estresse hídrico.	2013	Forageira/ sacarina: SF 15	32 t/ha de MV 10,2 t/ha de MS	Tabosa et al. (2013)

Tabela 5. Continuação

Localidade/ ambiente	Ano	Cultivares avaliadas	Nível de produtividade Alcançado	Fonte
Santa Maria da Boa Vista: sertão semiárido de PE, sob condição irrigada com água C1S1, em três colheitas sucessivas.	1978	Híbrido comercial de sorgo granífero/dupla finalidade	1º corte: 9.313 2º corte: 6.426 3º corte: 3.602 Total: 19.391 kg de grãos por hectare	Aguiar (1979)
Barreira-BA: área comercial, condição de sequeiro.	2015	Variedade de dupla finalidade IPA 1011	4.700 kg de grãos por hectare	Tabosa et al. (2013)
Perímetro irrigado de Bebedouro em Petrolina, 2017-2020: irrigação por gotejamento	2020	Variedades do IPA para silagem EP 17 e IPA SF 11; Variedades Embrapa 9910032, Ponta Negra	120,0 e 121,8 t/ha de MV e 45,0 e 37,1 t/ha de MS de grãos respectivamente 13.393 e 10.285 kg/ha, de grãos respectivamente.	Regitano Neto e Santos (2020)

MV - matéria verde; MS - matéria seca

Os destaques do potencial de materiais genéticos de cultivares de sorgo são: 1 - níveis de produtividade de matéria seca de sorgo sob irrigação da ordem de 69,3 t/ha obtido a partir do somatório de quatro cortes sucessivos em um período de 280 dias; 2 - maior nível de produtividade de matéria seca de sorgo sob condição de sequeiro em um único corte, de 50,0 t/ha; 3 - maior produtividade de grãos de sorgo - somatório de três colheitas sucessivas em condições de irrigação: 19.391 kg/ha; 4 - maior produtividade de grãos de sorgo (variedade experimental da Embrapa 9910032) em uma única colheita sob regime de irrigação, 13.393 kg/ha. Estes resultados evidenciam o potencial produtivo do sorgo para a região.

Um ponto importante para se obter elevadas produtividades de lavoura é utilizar o zoneamento de risco climático do Mapa. Atualmente

é válido para as cultivares graníferas, em função principalmente do ciclo e da região de recomendação. A partir de 2021/2022 será implementado o zoneamento para as cultivares forrageiras.

O Zarc (Zoneamento Agrícola de Risco Climático) é um instrumento de política agrícola e gestão de riscos na agricultura. O estudo é elaborado com o objetivo de minimizar os riscos relacionados aos fenômenos climáticos adversos e permite a cada município identificar a melhor época de plantio das culturas, nos diferentes tipos de solo e ciclos de cultivares. De acordo com a Embrapa Milho e Sorgo, o Zarc referente ao ano-safra 2020/2021, para as culturas do sorgo granífero e do milheto, foi estabelecido pelas Portarias DOU de 303 a 350 (Brasil, 2021).

Recursos Genéticos / BAG - Banco Ativo de Germoplasmas - Caracterização, Conservação, Potencial de Uso e Inovação e Perspectivas Futuras

Os recursos genéticos compreendem um grupo de genótipos com o objetivo de disponibilizar características genéticas favoráveis e portadores de valores atuais e potenciais passivos de investigação, com o devido manejo, utilização e, sobretudo, conservados (Martins Netto, 2010). Esses denominados recursos genéticos vegetais são organizados no mundo, e também no Brasil, em forma de coleções que podem ser disponibilizadas ou mesmo trocadas: os bancos de germoplasmas.

O Banco de Germoplasma de Sorgo do IPA foi iniciado em 1973. Esse BAG foi implantado concomitantemente com a criação de um programa denominado de Sorgo e Milheto (PSM) na região Nordeste, com apoio da Fundação Ford, Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene) e Banco do Nordeste do Brasil (BNB - FUNDECI). Este programa ficou a cargo do IPA até o final de 1979, e contou com a participação dos pesquisadores Mohamed A. Faris (pesquisador egípcio e líder de programa de pesquisas oriundo do órgão financiador) e Mário de Andrade Lira (emérito pesquisador e melhorista do IPA e professor da UFRPE, formador de escola e de equipes de pesquisadores, com atividades voltadas para o semiárido brasileiro).

Em prosseguimento ao desenvolvimento das pesquisas, apenas o BNB e a Sudene apresentaram expressivo apoio financeiro, até o início de 1990 (Swearing et al., 1971; Jonhson, 1978; Lira et al., 1986). A partir daí, o programa contou com recursos do estado de Pernambuco, da Financiadora

de Estudos e Projetos (Finep), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e de convênios com a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). O BAG do Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, atualmente se localiza na sede da instituição, na cidade do Recife, constituindo suporte de armazenagem e de conservação.

Quanto à natureza, os acessos compreendem: materiais graníferos com e sem tanino no grão; materiais forrageiros, de dupla finalidade para grão e forragem e para etanol e forragem; materiais sacarinos e para energia; e acessos de natureza herbácea, de sorgo sudão [*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.]. Em cerca de 20% do BAG, já foi realizada caracterização molecular.

A criação do BAG de sorgo, do IPA, remonta ao final dos anos 60 e vem, de forma ininterrupta, através das décadas seguintes, dando continuidade ao trabalho inicial, visando enriquecer o acervo.

A caracterização molecular de parte do BAG de sorgo do IPA foi iniciada tomando como base aspectos ligados à recomendação para o semiárido. Assim, de acordo com Santos et al. (2010), esse trabalho foi realizado com o objetivo de verificar a diversidade genética na coleção de acessos de materiais de sorgo do IPA, visando sua utilização em futuros trabalhos de seleção. Foram avaliados, nessa fase, acessos cultivados a partir de genótipos de sorgo gerados pelo IPA. A diversidade genética foi analisada por meio de marcadores do tipo RAPD. Com os 20 *primers* utilizados, foi amplificado um total de 737 bandas, sendo 34 polimórficas e 10 monomórficas, gerando 77% de genótipos polimórficos (Santos et al., 2010).

A partir dos acessos do BAG, o IPA desenvolve atividades de geração de novos materiais (cultivares) de sorgo, utilizando metodologias de melhoramento a partir de blocos de cruzamento, evoluindo até gerações avançadas e mantidas por autofecundação. As caracterizações são realizadas a partir de observações e mensurações, em condições de laboratório e campo, que compreendem caracteres de crescimento e fenologia, com base nos descritores específicos para esta espécie botânica.

Na Tabela 6 consta a descrição dos principais acessos de sorgo do BAG do IPA, que vêm sendo utilizados em programas de melhoramento, para o desenvolvimento de novos genótipos, para diferentes aptidões, no ambiente do semiárido brasileiro.

Tabela 6. Acessos do BAG do IPA

Grupo de acesso/ Aptidão	Dupla finalidade G/F	Dupla finalidade F/Em	FG	SC	HB	Coleção trabalho (F2/FN)	Total
Em avaliação/ mantidas	33	60	45	35	12	886	1.071
Cultivares registradas	2	2	2	1	1	-	8
RNC/Mapa Acessos obtidos via	15	10	-	-	3	-	28
Radiação gama Total	50	72	47	36	16	886	1.107

G/F – Granífero/forrageiro; F/Em – Forrageiro/energia; SC – sacarino; FG – Forrageiro; SC – Sacarino; HB – Híbridos

Inicialmente, o BAG do IPA foi formado por mais de mil acessos originários de diversos institutos internacionais de conservação de germoplasma e pesquisas de melhoramento genético de sorgo, como ICRISAT; Texas A & M, Kansas e Purdue University (Estados Unidos); Colorado State University – Forth Collins, Estados Unidos; Instituições da Etiópia e da África do Sul, antiga Agroceres e Embrapa Milho e Sorgo.

Introduções, intercâmbio e avaliações de germoplasma vêm sendo realizados em cooperação com entidades de pesquisa como a Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Tabuleiros Costeiros, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade Federal Rural de Pernambuco UFRPE, além de Institutos Federais (IFs). A partir desses materiais são desenvolvidos outros através de técnicas de cruzamento, seleção e de gerações avançadas por processos de autofecundações sucessivas.

O tipo de conservação executado, no Instituto, é por semente (do tipo *ex situ*) e varia de médio a curto prazo, sendo a coleção ativa sempre renovada. São usadas, para o acondicionamento das sementes, embalagens impermeáveis e herméticas e conservadas em câmara fria. Os acessos mantidos nessas condições são agrupados por variedade e chamados de

coleção de base de germoplasma semente. A coleção ativa (coleção de trabalho) é utilizada para pesquisa e caracterização e avaliação visando a exploração da variabilidade genética dos germoplasmas de sorgo, voltada para uso em programas de melhoramento.

A conservação dos acessos de sorgo é feita em câmara fria com temperatura de 10 °C e 30% de umidade relativa do ar. A viabilidade das sementes é periodicamente monitorada. O teste padrão de germinação das sementes, por acesso, é realizado no Laboratório de Análise de Sementes do IPA.

Aspectos do Melhoramento do Sorgo no Desenvolvimento de Materiais Genéticos para Região

Nos programas de melhoramento de sorgo direcionados para o semiárido, é necessário atentar para questões relacionadas principalmente às adversidades ambientais prevaletentes, como o estresse hídrico e a resistência à salinidade do solo, além da obtenção de cultivares precoces, tendo em vista, principalmente, a economia hídrica, por parte das plantas.

Entre os objetivos específicos do melhoramento genético do sorgo destacam-se principalmente: o aumento da produtividade (forragem, grão e energia na forma de etanol, como brix e ATR); adaptação ao semiárido brasileiro; elevação da qualidade nutricional das cultivares, dependendo da exigência do produto final para uso animal; além da obtenção de cultivares de ciclo precoce. Aliado a tudo isso, é importante destacar a necessidade de um manejo cultural e ambiental sustentável, por parte dos produtores, de modo a possibilitar a máxima expressão fenotípica dos novos materiais genéticos selecionados e recomendados (Amabile et al., 2018).

Para obtenção de novas variedades de sorgo, o método mais simples e prático é o de *pedigree* ou método genealógico, sendo as gerações avançadas através de seleção e autofecundações sucessivas, em conformidade com Poehlman e Sleper (1995). Esse processo também é utilizado nos materiais obtidos por indução e radiação gama, em que uma fonte de cobalto 60 (Co 60) poderá induzir possíveis e favoráveis mutações genéticas. *A posteriori*, seleções serão realizadas no foco da obtenção de novas progênes em atendimento às exigências da demanda regional. Nesse processo de utilização de radiação gama, foram obtidos resultados de genótipos de sorgo tolerantes à salinidade sob níveis de condutividade elétrica entre 15 e 30 dSm-1. A dose de radiação gama que permitiu esse ganho foi de 450 Gy. As alterações

genéticas obtidas foram comprovadas através de análises decorrentes do uso de marcadores moleculares do tipo microssatélites SSR – Sequências Simples Repetidas que caracterizaram essas alterações configuradas pelas diferenças de respostas observadas entre os materiais irradiados e o material sem irradiação (Tabosa et al., 2007).

Uma das principais características utilizadas para selecionar genótipos de plantas cultivadas tolerantes à seca é a produtividade. Mas essa variável é respaldada em outras diversas características secundárias: capacidade da planta de permanecer verde (“stay green”), relação favorável e adequada raiz/parte aérea, comprimento e volume das raízes, ciclo curto, etc. Outro fato relevante consiste na adaptação às condições de estresse hídrico, que poderão ser determinadas pelos alelos favoráveis à essa característica, quando em condições de seca.

O controle genético da tolerância a estresses ambientais e a eficiência de utilização desses atributos pela planta abrangem aspectos quantitativos, envolvendo muitos genes localizados, de forma aleatória, em muitos pontos do genoma. Esses aspectos tornam complexo esse tipo de seleção para tolerância ao estresse hídrico (Wu et al., 2008). Em face disso, é importante e necessária a possível utilização de caracteres secundários, contribuindo para que o processo de seleção apresente maior precisão. O controle genético dos caracteres de tolerância ao déficit hídrico é quantitativo. Nesse âmbito, novos modelos estatísticos-genéticos foram desenvolvidos no sentido de possibilitar o mapeamento e o entendimento dos locos (QTLs) que, possivelmente, são responsáveis pelo controle dos mencionados caracteres (Araus et al., 2012).

Assim, a utilização do melhoramento de sorgo compreende processos de obtenção de populações, linhagens e de hibridação de progenitores distintos que possibilitem combinações de alelos adequados oriundos de genitores distintos, no sentido de desenvolver a formação de novas cultivares que reúnam a maior quantidade de características desejáveis (Gomes et al., 2006). No caso de sorgo para produção de silagem, segundo Rodrigues (2014), a seleção somente baseada em características como a produção de matéria seca nem sempre proporciona maior rendimento animal, sendo mais importante o equilíbrio entre colmo, folha e panícula, associado a uma elevada produtividade de matéria seca e um adequado e alto valor nutritivo.

A diversificação das opções de cultivares de sorgo é fundamental para uma maior competitividade no âmbito da cadeia produtiva. Nesse processo, as cultivares promissoras previamente identificadas na população-

base são avaliadas em ensaios regionais, que possivelmente permitirão avaliar e visualizar aquelas que apresentem ampla adaptação geral ou específica, direcionando o processo de lançamento. Ensaios de competição entre cultivares são realizados todos os anos, em diversas regiões do País, pela Embrapa Milho e Sorgo e, em extensão, pelas empresas estaduais de pesquisa agropecuária, almejando avaliar várias cultivares (variedades e híbridos experimentais) no sentido de atender à demanda de cultivares e informações sobre esta cultura (Almeida Filho et al., 2012).

Como resultado do melhoramento do sorgo no semiárido no caso de cultivares que apresentaram resposta significativa e adequada para o aspecto de produção de biomassa e de grãos, existe na literatura uma grande quantidade de informações. No caso da produção de grãos, resultado da ordem de 19 toneladas por hectare já foi obtido por Aguiar (1979), considerado o maior já registrado, isso sob irrigação e em três colheitas sucessivas. Todavia, essa vertente vem atualmente sendo avaliada no tocante ao sorgo irrigado para alta produtividade. Nesse ponto, as informações são praticamente escassas quando comparadas com outras culturas anuais e mesmo com novos materiais de sorgo desenvolvidos para a região semiárida. Em publicação de Regitano Neto e Santos (2020), são veiculadas informações significativas e promissoras para a adequada resposta de cultivares de sorgo sob irrigação por gotejamento no semiárido das localidades de Petrolina e de Nossa Senhora da Glória, nos estados de Pernambuco e de Sergipe, respectivamente. As mais elevadas produtividades de matéria verde foram de 121,8 e 120,0 t/ha, e de matéria seca foram de 37,1 e 45,0 t/ha para as cultivares EP 17 e IPA SF 11, respectivamente, em um único corte. Nesses mesmos ambientes foram também obtidas produtividades de grãos de 13.393 e 10.285 kg/ha, para as cultivares da Embrapa 9910032 e BRS Ponta Negra, respectivamente. Esses níveis de produtividade são considerados muito elevados quando comparados aos resultados obtidos na literatura, não só no semiárido, mas em todo Brasil.

Com relação ao estudo da exploração da interação genótipos x ambientes, é relatado que a expressão das características das plantas cultivadas está ligada ao controle genético, ao ambiente e também sofre interferências da interação entre esses dois fatores (Mohammad; Amri, 2009). No melhoramento genético de plantas, o estudo da interação genótipo x ambiente é de extrema importância, quando a pretensão é a recomendação de genótipos. Entretanto, o estudo desta interação não informa a resposta de cada cultivar diante das variações ambientais, sendo necessárias as análises

de adaptabilidade e estabilidade (Cruz et al., 2012).

Existem diferentes metodologias voltadas para estudos de estabilidade, as quais são amplamente discutidas e distinguem-se pelos conceitos de estabilidade, adaptabilidade e princípios estatísticos empregados. Molina (2007), ao estudar métodos estatísticos na avaliação de interação genótipo x ambiente, relata 17 metodologias fundamentadas nos seguintes princípios: cinco métodos baseados em análise de variância; quatro métodos baseados em análise de regressão linear simples; quatro métodos baseados em análise de regressão linear bissegmentada; um método baseado em regressão quadrática; quatro métodos baseados em análise não lineares; três métodos baseados em análises não paramétricas, como a ordem de classificação genotípica. Além desses, são também relatados os métodos baseados em análises multivariadas que integram a análise comum de variância (método univariado) com a análise de componentes principais (método multivariado): método de análise da interação multiplicativa dos efeitos principais aditivos (AMMI), SREG, GREG, SHMM e COMM (Cornelius et al., 1996).

Com isso, e com o auxílio dessas técnicas mencionadas, como fruto de cultivares desenvolvidas pelos programas de melhoramento no semiárido brasileiro, vem sendo alvo de investigação científica um grande número de cultivares de uso multivariado que foram desenvolvidas pelo IPA e pela Embrapa.

Importância das Cultivares de Sorgo Desenvolvidas para o Semiárido Brasileiro – Registro de Atividade em Instituições de Ensino e Pesquisa da Região

Além do IPA, outras instituições localizadas na região, a partir dos anos 1970, vêm desenvolvendo atividades com a cultura do sorgo e utilizando cultivares (desenvolvidas em sua maioria pelo IPA e pela Embrapa) objeto e fruto do melhoramento, conforme pode ser observado na Tabela 7. Destacou-se também desse modo a UFC - Universidade Federal do Ceará, com um programa de sorgo e milho com aporte técnico e financeiro da Fundação Ford. Nesse período, a UFC desenvolveu diversos materiais de sorgo forrageiro e granífero com a denominação EA (BAG da antiga Escola de Agronomia). Dentre esses materiais destacaram-se como produtivas e adaptadas à região semiárida as variedades EA 116 e EA 955, além de híbridos experimentais EA 1906 e EA 1907. Da Tabela abaixo, a UFC representa 52% das atividades desenvolvidas e divulgadas com a cultura do sorgo na

região. Além da UFC, outra instituição que vem atualmente desenvolvendo atividades com a cultura do sorgo é a UFERSA – Universidade Federal Rural do Semiárido, antigamente representada pela ESAM – Escola Superior de Agronomia de Mossoró. A grande maioria das cultivares aí trabalhadas são oriundas da Embrapa e do IPA, no âmbito da resistência a fatores adversos ocorrentes da região – estresse hídrico e salinidade.

Tabela 7. Cultivares de sorgo utilizadas em atividades de pesquisa na região (além da Embrapa e IPA) por instituições locais, linhas temáticas e ano.

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFC	Forragicultura	Barrocas (1983)	Cultivar EA 116
IFCE	Fitotecnia	Gonçalves et al. (2012)	IPA SF 15 e Ponta Negra
EMPARN / UFRN	Fitomelhoramento	Cunha e Lima (2010)	Progenies avançadas IPA/ Embrapa
EMPARN – RN	Fitomelhoramento	Lima et al. (2010)	Variedades e híbridos IPA/ Embrapa
UFC	Bioquímica e Fisiologia Vegeta: sorgo tolerante à salinidade	Silva (2015)	Cultivares IPA SF 11 e SF 15
UFERSA	Ecofisiologia	Silva et al. (2014)	Ponta Negra
UFERSA	Ecofisiologia e Melhoramento	Costa et al. (2017)	BRS 506, BRS 511, BR 506, IPA SF 11 e SF 15, Ponta Negra.
UFERSA	Ecofisiologia e Melhoramento	Costa et al. (2019)	BRS 506, Ponta negra e IPA 2502.

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFERSA	Ecofisiologia e Melhoramento	Medeiros (2021)	Ponta Negra
UFERSA	Ecofisiologia/ Engenharia Agrícola	Nóbrega (2020)	IPA Sudan 4202
UFERSA	Fitomelhoramento	Fernandes et al. (1988)	IPA 467
UFMG	Fitotecnia e Manejo Animal	Nascimento (2019)	Híbridos Embrapa/ Variedades do IPA
UFPB	Agroclimatologia aptidão do sorgo para a Paraíba	Francisco et al. (2016)	Genótipos do Zoneamento
EMEPA	Fitotecnia e aptidão forrageira	Santos e Granjeiro (2013)	Ponta Negra/ IPA Sudan 4202
UFERSA	Melhoramento	Fernandes et al. (1992)	EA 116 / IPA 1011
EMBRAPA	Melhoramento	Carvalho e Aragão (1989)	Progênie avançada IPA/ EMBRAPA
EMBRAPA	Melhoramento	Carvalho et al. (2006)	Progênie avançada IPA/ Embrapa
EMBRAPA	Melhoramento	Carvalho et al. (2006)	Progênie avançada IPA/ Embrapa

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
EMBRAPA	Melhoramento	Carvalho e Serpa (1995)	Cultivares comerciais de sorgo granífero.
UFC	Bioquímica vegetal/ melhoramento	Ferreira (2012)	Cultivar CSF 20 tolerante à salinidade.
UNEB	Genótipos comerciais e sorgo	Quadros et al. (2019)	BRS-610, IPA-1011, IPA-467, SF-15 e SS-318
UFC	Interação genótipo /ambiente	Lacerda et al. (2006)	Genótipo CSF 20.
UFC	Bioquímica/ Genética	Miranda (2011)	Genótipo CSF 20.
UFERSA	Fitotecnia	Costa (2017)	BRS 511, BRS 508, IPA 467, IPA SF 15 e Ponta Negra.
UFC	Bioquímica/ Melhoramento	Oliveira (2017)	IPA Sudan 4202 e CSF 20
UFC	Bioquímica/ melhoramento	Oliveira e Gomes Filho (2009)	CSF 18 e CSF 20.
UFC	Fitotecnia	Ruppenthal (2016)	CSF 18 e CSF 20.

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFC	Bioquímica/ melhoramento	Marinho (2020)	CSF 20
UFC	Bioquímica	Oliveira e Gomes Filho (2009)	IPA 1011
UFC	Fitotecnia	Xavier (1985)	EA – 955, EA - 116
UFC	Seleção para estresses abióticos	Nunes et al. (2020)	EA 116, Ponta Negra.
UFC	Bioquímica vegetal e Ecofisiologia	Aquino et al. (2007)	CSF18 e CSF 20.
UFC	Bioquímica vegetal e Ecofisiologia.	Feijão et al. (2011)	IPA SUDAN 4202
UFCG	Engenharia de Processos	Silva (2019)	SF 15
UFCG	Engenharia de Processos - Etanol de 1ª e 2º geração	Silva (2017)	BRS 506, SF 15, IPA 2502 e EP 17.
UFC	Forragicultura Agroecológica	Vasconcelos Filho et. al. (2010)	EA – 955
UFC	Nutrição de Plantas	Castañon (2015)	Ponta Negra.

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFRPE/ UNIVASF	Ciências do Solo	Coelho (2017)	BRS 506, SF 15, IPA 467, EP 17.
UFB	Híbridos silageiros para o semiárido	Perazzo et al. (2017)	Híbridos Embrapa 944007 e outros.
UFPB	Eficiência em uso de água: genótipo tolerante à seca	Santos et al. (2020)	IPA SUDAN 4202
UFB	Cultivares para o semiárido	Perazzo et al. (2013)	IPA 1011, 2502, 467, SF 15.
UFC	Genótipos tolerantes à salinidade do solo.	Vieira et al. (2005)	IPA CSF 18 e CSF 20.
UFC	Fisiologia e bioquímica do sorgo	Queiroz et al. (2020)	IPA CSF 20
UFPI	Cultivares de sorgo para o semiárido	Nascimento et al. (2020)	Cultivares da Embrapa e do IPA
UFERSA	Ecofisiologia do sorgo	Medeiros (2021)	IPA Sudan 4202
UFC	Ecofisiologia e Bioquímica do sorgo	Oliveira (2011)	IPA Sudan 4202
UFERSA	Manejo do solo e da água	Lira (2016)	BRS Ponta Negra, BRS 506 e IPA 2502

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFC	Ciências do solo	Pinto (2011)	EA 955
UFC	Fisiologia vegetal	Carmo e Braga Sobrinho (1975)	EA 116, EA 955
UFC	Fisiologia vegetal	Akil e Araújo (1980)	EA 116, EA 955
UFC	Bioquímica vegetal	Prisco et al. (1975a)	EA 116
UFC	Bioquímica e fisiologia vegetal	Prisco et al. (1975b)	EA 116
UFC	Tecnologia de sementes	Prisco et al. (1975c)	EA 116
UFC	Bioquímica vegetal	Martins et al. (1977)	EA 116, AF 28
UFC	Tecnologia de sementes	Aragão et al. (1978)	EA 145
UFC	Fitomelhoramento	Santos e Mesquita (1980)	EA 116, EA 955
UFC	Fitomelhoramento	Carmo et al. (1975a)	BAG de sorgo da UFC – Coleção EA
UFC	Tecnologia de sementes	Akil e Queiroz (1978)	BAG de sorgo da UFC – Coleção EA

Continua...

Tabela 7. Continuação

Instituição ¹	Linha temática	Autores	Notas/ Genótipos de sorgo utilizados
UFC	Fitomelhoramento	Carmo et al. (1976)	Híbridos da UFC (EA) x Variedades
UFC	Fitomelhoramento	Nunes et al. (1975)	BAG sorgo da UFC – Coleção EA
UFC	Fitomelhoramento	Carmo et al. (1975b)	Híbridos comerciais x variedades EA
UFC	Fitomelhoramento	Carmo et al. (1972)	Linhagens Purdue x BAG da UFC – EA
UFC	Fitomelhoramento	Alves et al. (1985)	Híbridos EA 1906 e EA 1907 x variedades EA 949 e EA 952
UFC	Fitomelhoramento	Brasil et al. (1980)	Indian sorghum x coleção EA

* Instituições relacionadas: UFC – Universidade Federal do Ceará; IFCE – Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; EMPARN – Empresa de pesquisa agropecuária do Rio Grande do Norte; UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte; UFRSA-RN – Universidade Federal Rural do Semiárido; UFCG – Universidade Federal de Campina Grande; UFPB – Universidade Federal da Paraíba; EMEPA-PB – Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba; EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; UFAL – Universidade Federal de Alagoas; UFRPE – Universidade Federal Rural de Pernambuco; UNIVASF – Universidade Federal do Vale do São Francisco; UFPI – Universidade Federal do Piauí.

Referências

AGUIAR, P. A. A. Potencial anual de produção de sorgo granífero sob condições irrigadas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 12., 1978, Goiânia, GO. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa-DID, 1979. p. 119.

AKIL, B. A.; ARAÚJO, A. X. A. Seed deterioration and induction of secondary dormancy in grain sorghum. **Ciência Agrônômica**, v. 10, n. 1, p. 15-21, 1980.

AKIL, B. A.; QUEIROZ, G. M. Seed storage capacity of different grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) cultivars. **Ciência Agrônômica**, v. 8, n. 1/2, p. 65-71, 1978.

ALMEIDA FILHO, J. E. **Avaliação agrônômica e de estabilidade e adaptabilidade de híbridos de sorgo granífero**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

ALVES, J. F.; CARMO, C. M.; PAULA, P. H. F. Estabilidade de produção em sorgo forrageiro, *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 16, n. 2, p. 7-11, 1985.

AMABILE, R. F.; VILELA, M. S.; PEIXOTO, J. R. (ed.). **Melhoramento de plantas: variabilidade genética, ferramentas e mercado**. Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Melhoramento de Plantas, 2018. 108 p.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DOS PRODUTORES DE SEMENTES E MUDAS. **Grupo Pró-Sorgo**: evolução da área e produção do sorgo no Brasil. Disponível em: <http://www.apps.agr.br/dado-estatisticos/>. Acesso em: 2 fev. 2020.

AQUINO, A. J. S. de; LACERDA, C. F. de; BEZERRA, M. A.; GOMES FILHO, E.; COSTA, R. N. T. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007.

ARAGÃO, R. G. M.; CORDEIRO, J. A. D.; ALBUQUERQUE, M. C. E.; ALVES, J. F. Efeitos do ácido giberélico (AG3) na porcentagem e velocidade de germinação de sorgo - *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 8, n.1/2, p. 97-102, 1978.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; CORREIA, R. C.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA NETO, M. B. de; ARAÚJO, J. L. P.; SILVA, M. M. de L. Ambientes e solos do semiárido: potencialidades, limitações e aspectos socioeconômicos. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L. da; BRITO, L. T. de L. (ed.). **Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. p. 19-84.

ARAUS J. L.; SERRET M. D.; EDMÉADES G. O. Phenotyping maize for adaptation to drought. **Front Plant Physiology**, v. 3, article 305, 2012.

BARROCAS, F. A. L. **Efeito do Estádio de maturidade sobre o valor nutritivo da silagem de sorgo forrageiro - *Sorghum bicolor* (L) Moench, cultivar EA-116**. 1983. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1983.

BORÉM, A. **Melhoramento de plantas**. 20. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1997. 547 p.

BRASIL, G. A.; CARMO, C. M.; ALVES, J. F. Comportamento do sorgo forrageiro. **Ciência Agrônômica**, v. 10, n. 1, p. 83-87, 1980.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Novos zoneamentos do sorgo granífero e do milho orientam produção agrícola**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/novos-zoneamentos-do-sorgo-granifero-e-do-milho-orientam-producao-agricola>. Acesso em: 2 mar. 2021.

CARMO, C. M.; FARIS, M. A. E.; AGUIAR, P. A. A. Ensaio internacional de produção em sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Ciência Agrônômica**, v. 2, n. 1, p. 71-74, 1972.

CARMO, C. M.; BRAGA SOBRINHO, R. Influência do tamanho da semente no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do sorgo, *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 5, n. 1/2, p. 33-38, 1975.

CARMO, C. M.; NUNES, R. P.; MAMEDE, F. B. F. Comportamento do sorgo granífero, *Sorghum bicolor* (L.) Moench., no estado do Ceará, Brasil: I – Produção de grãos de dez variedades em seis microrregiões homogêneas. **Ciência Agronômica**, v. 6, n.1/2, p. 71-74, 1976.

CARMO, C. M.; NUNES, R. P.; BOUTY, F. A. C. Comportamento do sorgo forrageiro, *Sorghum bicolor* (L.) Moench., no estado do Ceará, Brasil: II – Produção de massa verde de híbridos comerciais em duas microrregiões homogêneas. **Ciência Agronômica**, v. 5, n. 1/2, p. 25-32, 1975a.

CARMO, C. M.; NUNES, R. P.; BOUTY, F. A. C. Comportamento do sorgo granífero, *Sorghum bicolor* (L.) Moench., no estado do Ceará, Brasil: III – Produção de grãos de híbridos comerciais em duas microrregiões homogêneas. **Ciência Agronômica**, v. 5, n. 1/2, p. 103-108, 1975b.

CARVALHO, A. L. S. **Seleção de genótipos de sorgo para produção de silagem**. 2019. 80 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

CARVALHO, H. W. L. de; ARAGÃO, W. M. **Avaliação de cultivares de sorgo forrageiro no estado de Sergipe. I - Comportamento de Progenies avançadas em Nossa Senhora da Glória, Gararu e Propriá**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1989. 29 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de Pesquisa, 4).

CARVALHO, H. W. L. de; PACHECO, E. P.; TABOSA, J. N.; RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. G. dos; BRITO, A. R. de M. B.; OLIVEIRA, V. D. de; RODRIGUES, K. F.; SOUZA, E. M. de; RIBEIRO, S. **Adaptabilidade e estabilidade de linhagens avançadas de sorgo forrageiro no estado de Sergipe**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. 17 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento,14).

CARVALHO, H. W. L. de; SERPA, J. E. S. **Avaliação de cultivares de sorgo granífero no estado de Sergipe**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1995. 6 p. (Pesquisa em Andamento, 33).

CASTAÑON, T. H. F. M. **Efeitos de diferentes formas e fontes de enxofre na produção de biomassa, nas características nutricionais do sorgo forrageiro e nas propriedades do solo.** 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

COELHO, D. S. **Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas.** 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

CORNELIUS, P. L.; CROSSA, J.; SEYEDSADR, M. S. Statistical test and estimator of multiplicative model for genotype-by environment interaction. In: KANG, M. S.; GAUCH JÚNIOR, H. G. (Ed.). **Genotype-by environment interaction.** New York: Boca Raton, 1996. p. 199-234.

COSTA, A. R. F. C. da; COSTA, J. P. N.; MEDEIROS, J. F. de; SILVA, M. V. T. da; LINO, V. A. da S. Desempenho de variedades de sorgo dupla aptidão submetidas a diferentes lâminas de irrigação com água salina. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 417-428, 2019.

COSTA, J. P. N. da. **Crescimento e produção da primeira rebrota de cultivares de sorgo sob diferentes lâminas de irrigação.** 2017. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2017.

COSTA, J. P. N.; MEDEIROS, J. F.; NUNES, R. M. de A.; CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; LIRA, J. F. B. Crescimento e produção da primeira rebrota de cultivares de sorgo sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 449-459, 2017.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético.** 4. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2012. 514 p.

CUNHA, E. E.; LIMA, J. M. P. de. Caracterização de genótipos e estimativa de parâmetros genéticos de características produtivas de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 4, p. 701-706, 2010.

FAO. Food Agriculture Organization. **Faostat 2019.** Roma, 2019. Disponível em: <http://www.faostat.org/site/567/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

FEIJÃO, A. R.; SILVA, J. C. B. da; MARQUES, E. C.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Efeito da nutrição de nitrato na tolerância de plantas de sorgo sudão à salinidade. **Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 3, p. 675-683, 2011.

FERNANDES, M. B.; CASTRO, J. R. de; AQUINO, B. F. de; FERNANDES, V. L. B.; ALVES, J. S.; GÓIS, F. C. de. Adaptabilidade de cultivares de sorgo granífero à solos salinos da microrregião salineira do estado do Rio Grande do Norte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 2, p. 217-222, 1992.

FERNANDES, M. B.; CASTRO, J. R. de; FERNANDES, V. L. B.; AQUINO, B. F. de; ALVES, J. S.; GOIS, F. C. de. Adaptabilidade de cultivares de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) às condições de salinidade da microrregião salineira norterio-grandense. **Ciência Agrônômica**, v. 19, n. 1, p. 135-140, 1988.

FERREIRA, T. M. **Respostas fisiológicas e bioquímicas de plantas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; BANDEIRA, M. M.; GUIMARÃES, C. L.; CABRAL, D. E. C. Aptidão climática do sorgo (*Sorghum bicolor*) para o estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 1043-1057, 2016.

GOMES, M. de S.; VON PINHO, R. G.; RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F. Alternativas para seleção de híbridos de milho envolvendo vários caracteres visando à produção de silagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 3, p. 406-421, 2006.

GONÇALVES, J. F. A.; FROTA, M. V. A.; VIEIRA, M. M. M. Desenvolvimento de sistema de produção para o cultivo do sorgo nos vales do Curu e Aracatiaçu-Ceará. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. **Ciência, tecnologia e inovação: ações sustentáveis para o desenvolvimento regional: anais**. Palmas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, 2012.

GRIFFING, B. Concept general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 9, n. 4, p. 463-493, 1956.

HAYMAN, B. I. The theory and analysis of diallel crosses. **Genetics**, v. 39, n. 6, p. 789-809, 1954.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**: produção agrícola municipal. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 6 nov. 2017.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**: produção agrícola municipal. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 6 fev. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 25 abr. 2021.

JONHSON, D. O sorgo granífero no nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 9, n. 4, p. 483-500, 1978.

LACERDA, C. F. de; MORAIS, H. M. de; MICHAEL, H.; PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E.; BEZERRA, M. A. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 3, p. 258-263, 2006.

LIMA, J. M. P.; MEDEIROS, A. C.; GONÇALVES, R. J. de S.; LIMA, J. G. A.; TABOSA, J. N.; LIRA, M. A.; SOBRINHO, E. E. Comportamento de cultivares de sorgo sacarino no agreste potiguar no estado do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., 2010, Goiânia. **Anais...** Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010. p. 354-358.

LIRA, R. B. **Cultivo do sorgo usando água de esgoto doméstico tratado como fonte hídrica**. 2016. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2016.

LIRA, M. A.; ARAÚJO, M. R. A.; MACIAL, G. A.; FREITAS, E. V.; ARCOVERDE, A. S. S.; LEIMIG, G. Comportamento de novas progênes de sorgo forrageiro para o semiárido pernambucano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, n. 11, p. 1239-1246, 1986.

MARINHO, S. de O. P. **Respostas fisiológicas e metabólicas mediadas pela fonte de nitrogênio: papel do NH₄⁺ na tolerância de plantas de sorgo sob salinidade**. 2020. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

MARTINS, A. J.; SANTOS, J. G. R.; ARAGÃO, R. G. M.; VIEIRA, F. V.; CARMO, C. M. Influência do teor de tanino em genótipos de sorgo *Sorghum bicolor* (L.) Moench., sobre o ataque da *Contarinia sorghicola* (Coquillet, 1898) (Dip., Cecidomyiidae). **Ciência Agrônômica**, v. 7, n. 1/2, p. 125-134, 1977.

MARTINS NETTO, D. A. **Coleção de base e coleção ativa: banco de germoplasma de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 27 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 99).

MEDEIROS, J. F. **Pesquisa comprova viabilidade da produção de sorgo em ambientes com alta salinidade**. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/index.php/plantas-xerofilas/11752-pesquisa-comprova-viabilidade-da-producao-de-sorgo-em-ambientes-com-alta-salinidade>. Acesso em: 5 abr. 2021.

MIRANDA, R. D. E. S. **Influência de diferentes fontes de N inorgânico na regulação da homeostase K⁺/Na⁺ e nas respostas fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro ao estresse salino**. 2011. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MOHAMMADI, R.; AMRI, A. Analysis of genotype x environment interactions for grain yield in durum wheat. **Crop Science**, v. 49, n. 4, p. 1177-1186, 2009.

MOLINA, L. M. R. **Um estudo sobre métodos estatísticos na avaliação de interação genótipo x ambiente em linhagens de arroz (*Oryza sativa* L.)**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

MONTALVAN, R.; FARIA, R. T. Variabilidade genética e germoplasma. In: DESTRO, D.; MONTALVÁN, R. **Melhoramento genético de plantas**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 1999. p. 27-38.

NASCIMENTO, R. R. do. **Características agronômicas e composição química entre híbridos de sorgo forrageiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

NASCIMENTO, R. R.; EDVAN, R. L.; PEREIRA FILHO, J. M.; RODRIGUES, J. A. S.; ARAÚJO, M. J.; SILVA, A. L. da; NASCIMENTO, K. dos S.; SANTOS, C. O. Identification of sorghum hybrids for silage production in the semiarid (BSh) region of northeastern Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 6, p. 2803-2814, 2020.

NÓBREGA, R. F. da. **Efeito da salinidade e lâminas de irrigação sobre o crescimento e produtividade do sorgo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.

NUNES, L. R. de L.; CRUZ, M. C.; PINHEIRO, C. L. Germination and vigour in genotypes of forage sorghum at different levels of water and salt stress. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 5, p. 1975-1986, 2020.

NUNES, R. P.; CARMO, C. M.; MAMEDE, F. B. F. Comportamento do sorgo forrageiro, *Sorghum bicolor* (L.) Moench., no estado do Ceará, Brasil: I - Produção de massa verde em dez variedades em sete microrregiões homogêneas. **Ciência Agrônômica**, v. 5, n. 1/2, p. 109-114, 1975.

OLIVEIRA, F. D. B. **Análise fisiológica e proteômica de plantas de sorgo sob estresse salino e nutridas com diferentes doses de nitrogênio**. 2017. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

OLIVEIRA, V. P. de. **Caracteres fisiológicos e bioquímicos de *Sorghum bicolor* e *Sorghum sudanense* sob condições de salinidade**. 2011. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

OLIVEIRA, A. B. de; GOMES-FILHO, E. Germinação e vigor de sementes de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 3, p. 48-56, 2009.

PERAZZO, A. F.; CARVALHO, G. G. P.; SANTOS, E. M.; BEZERRA, H. F. C.; SILVA, T. C.; PEREIRA, G. A.; RAMOS, R. C. S.; RODRIGUES, J. A. S. Agronomic evaluation of sorghum hybrids for silage production cultivated in semiarid conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 1088, 2017.

PERAZZO, A. F.; SANTOS, E. M.; PINHO, R. M. A.; CAMPOS, F. S.; RAMOS, J. P. de F.; AQUINO, M. M. de; SILVA, T. C. da; BEZERRA, H. F. C. Características agronômicas e eficiência do uso da chuva em cultivares de sorgo no semiárido. **Ciência Rural**, v. 43, n. 10, p. 1771-1776, 2013.

PINTO, O. R. O.; AZEVEDO, B. M.; MARINHO, A. B.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. A.; BRAGA, E. S. Adubação nitrogenada na cultura do sorgo granífero pelo método convencional de irrigação. **Agropecuária Técnica**, v. 32, n. 1, p. 132-140, 2011.

POEHLMAN, J. M.; SLEPER, D. **A Breeding field crops**. 4rd ed. Ames: Iowa State University Press, 1995.

PRISCO, J. T.; BARBOSA, L.; FERREIRA, L. G. R. Efeitos da salinidade na germinação e vigor de plântulas de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 5, n. 1/2, p. 13-17, 1975a.

PRISCO, J. T.; BARBOSA, L.; FERREIRA, L. G. R. Reguladores do crescimento e a reversão dos efeitos inibitórios da salinidade na germinação e vigor de plântulas de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 5, n. 1/2, p. 25-32, 1975b.

PRISCO, J. T.; BARBOSA, L.; FERREIRA, L. G. R. Pré-embebição como meio para sobrepujar os efeitos inibitórios da salinidade na germinação de sementes de *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Ciência Agrônômica**, v. 5, n. 1/2, p. 19-23, 1975c.

QUADROS, D. G. de; TELES, E. B. de S.; SANTOS, L. H. B. dos; ANDRADE, A. P. Características agronômicas e rendimento forrageiro de genótipos comerciais de sorgo forrageiro na região oeste da Bahia. **Revista Agrária Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 45-59, 2019.

QUEIROZ, C. S. de; PEREIRA, I. M. C.; LIMA, K. R. P.; BRET, R. S. C.; ALVES, M. S.; GOMES-FILHO, E.; CARVALHO, H. H. de. Combined NaCl and DTT diminish harmful ER-stress effects in the sorghum seedlings CSF 20 Variety. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 147, p. 223-234, 2020.

REGITANO NETO, A.; SANTOS, R. D. Agronomic traits evaluation in irrigated sorghum in the brazilian semiarid. **Revista brasileira de milho e Sorgo**, v. 19, e1179, 2020.

RODRIGUES, J. A. S. Híbridos de sorgo forrageiro: Onde estamos? Para onde vamos? In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 7., 2014, Viçosa. **Anais....** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2014. p. 301-328.

RODRIGUES, J. A. S.; MENEZES, C. B. de; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; TABOSA, J. N. Utilização do sorgo na nutrição animal. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 229-246. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

ROONEY, L. W. **Food and nutritional quality of sorghum and millet**. Nebraska: INTSORMIL, 2007. 115 p.

RUPPENTHAL, V. **Respostas fisiológicas e bioquímicas de plântulas de sorgo sob estresse salino e supridas com silício e fósforo**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SANTOS, G. C. L.; GARCIA, P. H. M.; VIANA, T. B. L.; BORGES, P. F.; ARAÚJO, L. S.; GONZAGA, S. Crescimento e eficiência do uso da água do sorgo sob distintos regimes hídricos contínuos. **Archivos de Zootecnia**, v. 69, n. 265, p. 14-21, 2020.

SANTOS, J. H. R.; MESQUITA, A. L. M. Estudo da idade para desbaste em sorgo granífero *Sorghum bicolor* (L.) Moench, no estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, v. 1, n. 2, p. 25-38, 1980.

SANTOS, I. L. V. L.; SILVA, P. G.; LIMA JÚNIOR, S. F.; SOUZA, P. R. E.; TABOSA, J. N.; MAIA, M. D. Utilização de RAPD na caracterização molecular de acessos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. (Moench.) recomendados para Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 60-66, 2010.

SANTOS, J. F. dos; GRANGEIRO, J. T. Performance of sorghum cultivars for forage and grain in Paraíba state. **Tecnologia & Ciencia Agropecuária**, v. 7, n. 2, p. 49-55, 2013.

SILVA, J. L. de A.; MEDEIROS, J. F. de; ALVES, S. S. V.; OLIVEIRA, F. de A. de; SILVA JÚNIOR, M. J. da; NASCIMENTO, I. B. do. Uso de águas salinas como alternativa na irrigação e produção de forragem no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 566-572, 2014. Suplemento.

SILVA, M. J. V. da. **Avaliação no potencial de diferentes cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para produção de etanol de 1a e 2a geração**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SILVA, M. L. dos S. **Avaliação da Tolerância à salinidade em quatro genótipos de sorgo sacarino**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SILVA, R. de A. **Produção de enzimas celulolíticas e xilanolítica a partir do bagaço do sorgo sacarino por fermentação semissólida e submersa**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SIMPLÍCIO, J. B.; TABOSA, J. N.; BARROS, A. H. C.; SILVA, F. G.; SILVA FILHO, J. G.; ANDRADE, J. J. Avaliação de diferentes cultivares de sorgo irrigado e submetidos a quatro cortes sucessivos no semiárido alagoano. In: PEREIRA, A. I. A. (Org.). **De grão em grão**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2019. p. 22-32.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE.

Nota Técnica nº 023/2017. Recife, 2017. Disponível em: <http://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/nota-tecnica-23-2017-sudene>. Acesso em: 15 de jan. 2021.

SWEARINGIN, M. L.; FOLEY, J. R.; MORRIS, W. H. B.; NEVES, J. D. **Sorgo granífero para o nordeste brasileiro**: estudo de viabilidade. Washington: Agência Norte Americana para o Desenvolvimento Internacional, 1971. 148 p.

TABOSA J. N.; BARRROS, A. H. C.; SILVA, F. G. da; BRITO, A. R. de M. B.; SIMÕES, A. L.; MESQUITA, F. L. T. de; NASCIMENTO, M. M. A. do; SILVA FILHO, J. G. da; FRANÇA, J. G. E. de; SILVA, A. B. da; FERRAZ, I.; CARVALHO, E. X. de; CORDEIRO, A. L.; SIMPLÍCIO, J. B. Importância do melhoramento genético de diferentes tipos de sorgo para as mesorregiões do agreste, sertão e afins do semiárido brasileiro. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L. da; BRITO, L. T. de L. (ed.). **Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. p. 515-569.

TABOSA, J. N.; RODRIGUES, J. A. S.; SIMPLÍCIO, J. B.; BRITO, A. R. M. B.; SANTOS, V. F.; NASCIMENTO, M. M. A. Variedades experimentais de sorgo forrageiro no semiárido brasileiro - Parâmetros genéticos de produção em solos salinos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Milho e sorgo**: inovações, mercados e segurança alimentar: anais. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2016.

TABOSA, J. N.; BARROS, A. H. C.; BRITO, A. R. de M. B.; SIMPLÍCIO, J. B. Cultivo do sorgo no semiárido brasileiro: potencialidades e utilizações. In: FIGUEIREDO, M. do V. B.; SILVA, D. M. P. da; TABOSA, J. N. BRITO, J. Z. de; FRANÇA, J. G. E. de; WANDERLEY, M. de B.; SANTOS FILHO, A. S. dos; GOMES, E. W. F.; LOPES, G. M. B.; OLIVEIRA, J. de P.; SANTIAGO, A. D.; SILVA, F. G. da; PACHECO, M. I. N.; SILVA, C. C. F. da (Ed.). **Tecnologias potenciais para uma agricultura sustentável**. Recife: IPA, 2013. p. 133-162.

TABOSA, J. N.; COLAÇO, W.; REIS, O. V.; SIMPLÍCIO, J. B.; CARVALHO, H. W. L.; DIAS, F. M. Sorghum genotypes evaluation under salinity levels and gamma ray doses. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, n. 3, p. 339-350, 2007.

TABOSA, J. N.; REIS, O. V. dos; NASCIMENTO, M. M. A.; LIMA, J. M. P. de; SILVA, F. G. da; FILHO, J. G. S.; BRITO, A. R. M. B.; RODRIGUES, J. A. S. O sorgo sacarino no semi-árido brasileiro: elevada produção de biomassa e rendimento de caldo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 28., 2010, Goiânia. **Anais...** Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010.

VASCONCELOS FILHO, A. R. B.; SIZENANDO FILHO, F. A.; OLIVEIRA, M. J. de S.; SALES, R. de O. Composição químico-bromatológica do sorgo. **Revista Verde**, v. 5, n. 5, p. 1-16, 2010.

VIEIRA, M. R.; LACERDA, C. F. de; CÂNDIDO, M. J. D.; CARVALHO, P. L. de; COSTA, R. N. T.; TABOSA, J. N. Produtividade e qualidade da forragem de sorgo irrigado com águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 42-46, 2005.

WU, J. M.; LIU, C.; SHI, Y. S.; SONG, Y. C.; CHI, S. M.; MA, S. Y.; WANG, T. Y.; LI, Y. QTL analysis of flowering related traits in maize under different water regimes. **Journal of Maize Sciences**, v. 16, n. 5, p. 61-65, 2008.

XAVIER, J. J. B. N. **Densidade populacional de sorgo e seus efeitos na produtividade e qualidade da semente**. 1985. 79 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1985.

Capítulo 12

Melhoramento de sorgo para tolerância à seca

*Cicero Beserra de Menezes
Karla Jorge da Silva
Geraldo Afonso de Carvalho Junior
Paulo César Magalhães
Robert Eugene Schaffert*

Introdução

O plantio de sorgo no Brasil ocorre principalmente durante a segunda safra nas regiões de Cerrado. Esse sistema pode apresentar limitações, como acidez do solo, fertilização subótima e eventos recorrentes de seca e temperatura, os quais podem desfavorecer ainda mais os cultivos de outros cereais, tais como o milho. Além disso, com a demanda crescente de fontes alternativas de proteína vegetal, novas fronteiras estão sendo abertas para o cultivo de sorgo, por exemplo, a região do Matopiba (Maranhão-Tocantins-PiauÍ-Bahia). Tal expansão apresenta desafios similares aos cultivos tradicionais do Cerrado. Assim, características como alto potencial produtivo, tolerância à acidez do solo, eficiência na aquisição de nutrientes sob condições de baixa fertilidade e tolerância à seca são indispensáveis nas cultivares recomendadas para esses sistemas.

Tolerância à Seca em Sorgo

A tolerância à seca é definida como a capacidade da planta de suportar o déficit hídrico, mantendo atividades fisiológicas adequadas para estabilizar e proteger a integridade celular e metabólica. Em sorgo, a expressão da tolerância à seca é o resultado da interação de múltiplos fatores ambientais e processos fisiológicos da planta (Tuinstra et al., 1998; Assefa et al., 2010), por meio de mecanismos de escape, prevenção da desidratação e tolerância à desidratação (Ludlow, 1993; Blum, 2004; Shehzad; Okuno, 2014; Fracasso et al., 2016).

O estresse hídrico pode ocorrer basicamente em duas épocas durante o desenvolvimento da planta de sorgo: em pré e pós-florescimento. No pré-

florescimento, o estresse ocorre entre as fases de diferenciação da panícula e de florescimento (estádios E4-E6). Já em pós-florescimento, o estresse acontece durante o enchimento de grãos (estádios E6-E8) (Nguyen et al., 1997b). Em ambos os estádios, o estresse reduz o rendimento de grãos substancialmente (Figura 1).

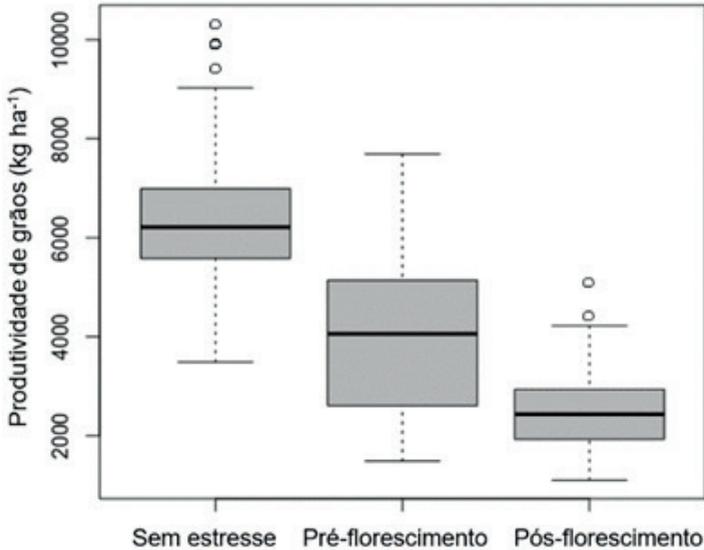


Figura 1. Produtividade de grãos em híbridos de sorgo cultivados sob três condições de água (sem déficit hídrico, déficit hídrico em pré-florescimento e déficit hídrico em pós-florescimento). Nova Porteirinha-MG, 2018.

Fonte: Batista (2018).

Mecanismos de Escape

A maturação precoce é um mecanismo de “escape da seca”, em que a cultura completa seu ciclo antes do início de déficits severos de umidade no solo. No plantio de segunda safra, onde o estresse pós-florescimento é comum, cultivares de maturação precoce podem escapar do estresse no final do seu ciclo. O aumento da precocidade reduz as taxas de evapotranspiração e a densidade de raízes em sorgo (Blum, 1979; Reddy; Patil, 2015), o que tende a reduzir a produtividade. Até certo ponto, a perda de rendimento pode ser compensada pelo aumento da densidade de plantio, mas essa estratégia deve ser estudada com cautela, pois depende do sistema de produção.

Desta forma, é importante que os programas de melhoramento

desenvolvam cultivares de ciclos variados (superprecoce, normal e tardio) no seu portfólio. Materiais de ciclos mais longos podem ser posicionados no início da janela de plantio, e híbridos superprecoces podem ficar para o fechamento dela. Híbridos que florescem entre 50 e 65 dias após a germinação são encontrados no mercado nacional, faixa desejável para o cultivo em segunda safra.

Prevenção da Desidratação

A prevenção da seca é um mecanismo para minimizar a falta de água ou garantir níveis satisfatórios de hidratação nos tecidos durante períodos de seca, mantendo o turgor e o volume das células. Tal mecanismo é possível através da absorção agressiva de água via sistema radicular extenso ou da redução da perda de água pela transpiração e outras vias não estomáticas, por exemplo, as cutículas da planta (Ludlow; Muchow, 1990; Amelework et al., 2015). O sorgo apresenta ambas as características, permitindo maiores níveis de tolerância em comparação a outros cereais.

O sorgo consegue extrair água de camadas profundas do solo porque possui mais raízes secundárias por unidade de raízes primárias do que outros cereais. Por exemplo, em comparação com o milho, o sorgo tem o dobro de raízes secundárias por unidade de raiz primária (Martin, 1930). Genótipos com grande número de raízes seminais e grande diâmetro de vasos nas raízes nodais e seminais apresentam maior tolerância à seca (Bawazir; Idle, 1989). Além disso, o sistema radicular do sorgo é mais extenso, fibroso e possui maior número de pelos absorventes (Magalhães et al., 2015).

As paredes celulares permitem às células vegetais desenvolverem enormes pressões hidrostáticas internas, denominadas pressão de turgor. A manutenção da pressão de turgor é essencial para muitos processos fisiológicos, incluindo expansão celular, abertura estomática, transporte no floema e vários processos de transporte através de membranas. A pressão de turgor também contribui para a rigidez e a estabilidade mecânica de tecidos vegetais não lignificados (Taiz et al., 2017).

Outra característica importante no sorgo é a presença de cera epicuticular. Acredita-se que altas concentrações de ceras aumentam a tolerância à seca nas plantas por causa de redução da temperatura e da perda de vapor de d'água nas folhas (Jordan et al., 1983, 1984).

Tolerância à Desidratação

A tolerância à seca é um mecanismo pelo qual a planta mantém o metabolismo mesmo com baixo potencial hídrico. O desenvolvimento, a estrutura e as propriedades da superfície do dossel, a capacidade de ajustar a área foliar de acordo com a disponibilidade de umidade e os atributos funcionais, como o ajuste osmótico (AO), desempenham papéis importantes na regulação do uso de água pelas plantas cultivadas (Taiz et al., 2017).

O potencial de água da folha indica o status de água de toda a planta, e a manutenção de alto potencial está associada a mecanismos de prevenção de desidratação. Antes da floração, as plantas evitam a desidratação mantendo um alto potencial de água da folha, enquanto após a floração, as plantas evitam a desidratação mantendo maior turgor em um determinado nível de estresse de umidade (Rosenow et al., 1983). A condutância estomática e o enrolamento das folhas são considerados indicadores fisiológicos confiáveis de tolerância à seca (Kadioglu; Terzi, 2007) e associados com potencial de água na folha (Bittman; Simpson, 1989). O enrolamento da folha aumenta o fechamento estomático, aumentando a resistência da folha à perda de água (Amelework et al., 2015) ao diminuir a radiação incidente (Heckathorn; DeLucia, 1991).

Sob estresse moderado, o retardo no enrolamento das folhas pode estar associado ao crescimento e à produção das plantas. No entanto, sob condições severas de seca e estresse por calor, maior enrolamento das folhas pode estar associado a melhores chances de recuperação quando o estresse por umidade for aliviado (Blum et al., 1992).

O ajuste osmótico pode ser definido como o acúmulo ativo de solutos dentro do tecido da planta (tanto nas raízes quanto na parte aérea) em resposta à redução do potencial hídrico do solo, o que ajuda a manter o turgor de ambos, na medida em que as plantas são submetidas ao estresse hídrico (Morgan, 1984). Os solutos protegem as plantas do estresse por meio da contribuição para o ajuste osmótico, desintoxicação de espécies reativas de oxigênio reativo e estabilização de membranas e estruturas naturais de enzimas e proteínas (Farooq et al., 2009). O estresse hídrico pode causar peroxidação da membrana lipídica por espécies ativadas de oxigênio como resultado do comprometimento do transporte de elétrons nas plantas. A peroxidação lipídica no sorgo é muito mais baixa e ocorre mais tarde durante o estresse hídrico do que em outras culturas (Zhang; Kirkham, 1996b). Este processo também contribui para a tolerância do sorgo à seca.

No sorgo, a prolina (Sivaramakrishnan et al., 2006), a glicina betaina (Yang et al., 2003) e os açúcares funcionam como osmólitos que protegem as células da desidratação (Wood; Goldsbrough, 1997). O acúmulo de glicina betaina nas células pode ajudar as plantas a manter a água dentro das células ou proteger o componente celular da desidratação (Yang et al., 2003). Waldren e Teare (1974) observaram que, em condições de estresse hídrico, a prolina livre aumentou mais de 200 vezes no sorgo e mais de 60 vezes na soja. No entanto, o acúmulo de prolina livre não parece ser um bom indicador de estresse hídrico porque o sinal não ocorre até que haja uma necessidade crítica de água.

Em razão de todos esses fatores, o sorgo requer menos água para se desenvolver, sendo que o florescimento é o período mais crítico à falta de água (Aldrich et al., 1982). Por exemplo, o sorgo necessita de 271 kg de água para produzir 1 kg de matéria seca, enquanto o milho e o trigo necessitam de 372 e 505 kg de H₂O/kg de matéria seca, respectivamente.

Durante o ciclo, o sorgo granífero requer por volta de 25 mm de chuva após o plantio, 250 mm durante o crescimento e 25 a 50 mm durante a maturidade para uma produção satisfatória de grãos (Doggett, 1970). Quando comparado ao milho, o sorgo se sobressai em termos produtivos em condições de estresse hídrico. Porém, mesmo sendo um dos cereais mais tolerantes à seca, a espécie pode sofrer danos significativos durante o desenvolvimento da planta quando a restrição hídrica é intensa (Menezes et al., 2015; Batista, 2018).

Dentre os sintomas de suscetibilidade ao estresse hídrico em pré-florescimento destacam-se o enrolamento das folhas, presença de folhas mais eretas, descoloração de folhas, queima das pontas e bordas da lâmina foliar, efeito cela (maior produção nas panículas das extremidades do talhão), redução do tamanho do pedúnculo, aparecimento de falhas na panícula (*blasting*), aborto de flores e redução do tamanho da panícula (Rosenow et al., 1996; Jordan; Sullivan, 1982; Reddy et al., 2006). Além dos efeitos mencionados, o estresse em pré-florescimento também causa redução da altura da planta e acelera o período de florescimento (Batista, 2018).

Já a suscetibilidade à seca em pós-florescimento ocasiona morte prematura da planta, colapso do colmo, acamamento, aumento da suscetibilidade à podridão por *Macrophomina* e expressiva redução no tamanho da semente, principalmente na base da panícula (Reddy et al., 2006; Krupa et al., 2017). Comparativamente, efeitos antagonicos podem

ocorrer em órgãos específicos da planta se o estresse ocorre em pré ou pós-florescimento. Se o estresse ocorrer em pré-florescimento e a umidade voltar, o grão crescerá normalmente. Porém, se o estresse ocorrer em pós-florescimento, o tamanho do grão reduz de forma substancial (Batista, 2018). A diminuição da produtividade causada pelo estresse em pré-florescimento ocorre pela redução do número de grãos na panícula, ao contrário do que ocorre no estresse pós-florescimento, em que a redução do tamanho do grão é mais importante.

O índice de clorofila da planta reduz com o corte da irrigação no pré-florescimento, mas volta a aumentar se a umidade do solo retorna, mostrando recuperação na capacidade fotossintética da planta de sorgo. No estresse pós-florescimento, o índice de clorofila reduz significativamente após 30 dias de estresse, afetando o enchimento do grão, com consequente queda na produtividade (Batista, 2018).

Por causa da complexidade da interação entre plantas e estresse hídrico, não existe uma característica isolada que possa indicar a tolerância à seca. Portanto, devemos nos concentrar em uma abordagem holística para desenvolver cultivares mais adaptadas a essa condição (Magalhães; Durães, 2003).

Genética da Resistência à Seca

Alguns caracteres em sorgo, tais como *stay-green*, volume de raiz, índice de área foliar, altura de planta e índice de colheita, mostraram altos valores para coeficientes de variação fenotípico e genotípico, com estimativas altas de herdabilidade e ganho genético esperado, indicando a presença de efeito aditivo no controle destes caracteres (Vinodhana et al., 2009). Observou-se também alta variação genotípica para massa seca de raiz e perda de massa de folhas excisadas entre caracteres relacionados à folha no estágio de plântula (Ali et al., 2009).

Menezes et al. (2015), avaliando rendimento de grãos em 25 linhagens de sorgo em campo, em condições de controle e com a presença de estresse hídrico, encontraram herdabilidade média no sentido amplo de 88% para rendimento de grãos, mostrando que é possível fazer seleção de sorgo para tolerância à seca em campo. *Stay-green*, teor de clorofila, fluorescência da clorofila, temperatura do dossel e eficiência de transpiração são características de componentes secundários de produção. Tais caracteres possuem valores de herdabilidade moderados a altos sob estresse hídrico

(Harris et al., 2007; Kumar et al., 2008; Roháček et al., 2008; Liu et al., 2010; Kapanigowda, 2011; Mutava et al., 2011; Talebi, 2011).

Kapanigowda (2011) observou alta herdabilidade, em sentido amplo (0,77- 0,90), para eficiência de transpiração em sorgo. Mutava et al. (2011) relataram ampla variabilidade em 300 genótipos, envolvendo as diferentes raças de sorgo, para conteúdo de clorofila, temperatura de folha, fluorescência da clorofila (rendimento quântico do fotossistema II), índice de colheita e rendimento de grãos. Al-Naggar et al. (2007) relataram que as estimativas de herdabilidade no sentido restrito foram geralmente maiores no ambiente sem estresse do que sob estresse hídrico e variaram de 12,5% para massa de 1.000 grãos a 50,5% para área foliar sob ausência de estresse, e de 6,4% para conteúdo relativo de água a 35,4% para área foliar no ambiente com estresse hídrico.

Existem cinco tipos distintos de expressão de *stay-green* na planta em que a ocorrência de modificações fisiológicas e genéticas pode ser detectada. Dois ou mais tipos de *stay-green* podem aparecer combinados numa planta. O tipo A ocorre quando as folhas e os caules mantêm sua área fotossintética ativa por mais tempo, sofrendo um atraso na senescência da planta. No tipo B, a senescência ocorre no período normal de desenvolvimento da planta, mas ocorre de forma relativamente lenta. No tipo C, também conhecido como *stay-green* cosmético, há acúmulo de pigmentos na superfície da folha, dando a impressão de que há uma redução da senescência. No entanto, a taxa de degradação da proteína e da clorofila ocorre normalmente abaixo da superfície verde. O tipo D é recorrente nos herbários e no congelamento de vegetais, nos quais a cor verde é mantida com a morte rápida das folhas por congelamento, fervura ou secagem. O tipo E é descrito como aquele com maior teor de clorofila nos tecidos fotossintéticos, e esse aumento da concentração resulta em atraso no amarelecimento das folhas e caules (semelhante ao tipo A) e manutenção do tecido verde, mesmo com reduzida capacidade de fixação de dióxido de carbono (Thomas; Howarth, 2000).

O *stay-green* é uma característica importante no sorgo uma vez que está associada à tolerância à seca em pós-florescimento. Genótipos com alta expressão de *stay-green* completam o enchimento de grãos normalmente sob estresse hídrico e exibem maior resistência à podridão seca e ao acamamento. A importância do *stay-green* no desenvolvimento do dossel, anatomia foliar, crescimento radicular, captação de água e rendimento de grãos foi relatado por Borrell et al. (2014a, 2014b). As variedades com *stay-green* superam as

variedades senescentes sob estresse em pós-florescimento.

O *stay-green* é um caractere complexo do ponto de vista genético e fisiológico, exibindo padrões diversos de expressão e interação com o ambiente (Oosterom et al., 1996; Thomas; Howarth, 2000). A expressão do *stay-green* se torna mais proeminente quando as condições de crescimento da cultura são favoráveis antes da floração, seguido por um estresse durante o estágio de enchimento dos grãos. A base genética e fisiológica do *stay-green* foi estudada usando diferentes germoplasmas de sorgo (Tuinstra et al., 1997; Crasta et al., 1999; Subudhi et al., 2000; Tao et al., 2000; Xu et al., 2000; Kebede et al., 2001; Haussmann et al., 2002). Apesar do efeito maior de um gene dominante, os trabalhos mostram que *stay-green* é um caráter poligênico com grande influência ambiental (Henzell et al., 1992; Walulu et al., 1994; Oosterom et al., 1996).

Vários QTLs associados a *stay-green* em ensaios de seca em pós-florescimento foram mapeados (Tuinstra et al., 1997, 1998; Crasta et al., 1999; Tao et al., 2000; Xu et al., 2000; Subudhi et al., 2000; Kebede et al., 2001; Haussmann et al., 2002; Sanchez et al., 2002). Marcadores moleculares ligados a esses QTLs estão disponíveis (Hash et al., 2003; Harris et al., 2007; Kassahun et al., 2009). Os estudos moleculares identificaram quatro QTLs principais designados como Stg1, Stg2, Stg3 e Stg4, bem como muitos QTLs de efeito menor (Sabadin et al., 2012). Stg1 e Stg2 foram mapeados no cromossomo 3 do sorgo, explicando aproximadamente 20% e 30% da variância fenotípica, respectivamente (Xu et al., 2000; Sanchez et al., 2002; Harris et al., 2007). Stg3 está localizado no cromossomo 2; e Stg4, no 5, respondendo por 16% e 10% da variância fenotípica, respectivamente (Sanchez et al., 2002; Harris et al., 2007). A combinação de alelos positivos em Stg2 e Stg3 explicou aproximadamente a metade da variância fenotípica para a característica, excedendo a soma dos efeitos individuais dos QTLs (Subudhi et al., 2000). Tuinstra et al. (1997) relataram a colocação de QTLs de *stay-green* e de produção de grãos sob estresse de seca, sugerindo que o(s) gene(s) subjacente(s) ao *stay-green* também pode(m) resultar em maior rendimento de grãos sob estresse de seca.

Diferentes QTLs foram mapeados para *stay-green* utilizando-se a linhagem E36-1 como um dos parentais. Os resultados indicaram que esta fonte possui alelos favoráveis para vários QTLs relacionados a *stay-green*. Tal efeito não foi detectado em estudos anteriores quando as fontes B35 (BTx642) e SC56 foram utilizadas. As linhagens B35, SC56 e E36-1,

doadoras de alelos favoráveis para a expressão do *stay-green*, demonstram que QTLs para tal característica estão amplamente distribuídos dentre os 10 cromossomos do sorgo (Reddy et al., 2006). Além de Stg2 e Stg3, outro QTL, o StgB, foi identificado, cujos genes subjacentes estão associados às enzimas-chave do metabolismo da clorofila (Rama Reddy et al., 2014).

Tuinstra et al. (1996) encontraram seis regiões genômicas distintas associadas à tolerância à seca em pré-florescimento em sorgo em uma população de RILs derivada do cruzamento entre os parentais Tx7078 e B35 (Tuinstra et al. 1996). Esses loci foram responsáveis por aproximadamente 40% da variação fenotípica total para produção de grãos sob seca em pré-florescimento e foram detectados em uma variedade de ambientes. Kebede et al. (2001) identificaram quatro QTLs que conferem tolerância à seca em pré-florescimento em sorgo a partir de RILs derivadas do cruzamento entre as linhagens SC56 e Tx7000. No entanto, esses QTLs não eram consistentes em todos os ambientes. Kebede et al. (2001) também notaram uma forte associação entre a tolerância à seca em pré-florescimento e maturação.

Awika et al. (2017) mapearam 28 QTLs associados à redução da temperatura do dossel, quantidade de cera epicuticular e dias para florescimento em 5 cromossomos distintos do sorgo. A maioria dos alelos associados a maiores valores de produção de cera e menores valores de temperatura do dossel estava associada à tolerância à seca e veio do parental Tx7000.

Características de morfologia radicular também podem ser utilizadas para acelerar a seleção para tolerância à seca. As plantas de sorgo apresentam sistema radicular fibroso, característico das gramíneas, que pode atingir profundidades de até 1,5 a 2,4 m (Kimber, 2000). Os estudos da morfologia radicular têm sido feitos por meio da avaliação de características como comprimento, volume, densidade, número, ângulo, área de superfície, diâmetro e massa seca.

Estudar a base genética e fisiológica de características de raízes em cereais é por definição uma tarefa desafiadora. Porém, alguns métodos de fenotipagem podem ser utilizados com certa eficiência (Joshi et al., 2016; Wasaya et al., 2018). Atualmente, os métodos mais utilizados para fenotipagem de raiz são realizados em condições controladas em cultivo hidropônico, câmaras de gel, solo e outros substratos artificiais, e no campo. Para cada método existem vantagens e desvantagens, sendo que a estrutura física do programa é que define qual método usar. Aliados a novas plataformas

de imagem 2D e 3D e recursos computacionais, esses métodos permitem a caracterização morfológica de raiz com alta resolução, precisão e acurácia (Wasaya et al., 2018). A Tabela 1 apresenta alguns dados sumarizados sobre diferentes métodos de fenotipagem de raiz.

Tabela 1. Propriedades de alguns métodos utilizados para fenotipagem de morfologia radicular em sorgo.

Método de fenotipagem	Característica avaliada	Estádio de fenotipagem	Referências
Cilindros de PVC	Comprimento e taxa de alongamento	5 folhas	Singh et al. (2010, 2012)
Câmara de acrílico/ Rhizotrons	Comprimento, volume, diâmetro, número e área	5 folhas	Singh et al. (2010), Joshi et al. (2017), Martins et al. (2020)
Polietileno Glicol (PEG)	Comprimento, massa fresca e massa seca	14 DAS	Bibi et al. (2012), Gill et al. (2002)
Papel de germinação	Comprimento, volume, número, área	20 DAS	Parra-Londono et al. (2018)
Vasos de plástico/ WinRhizo	Comprimento, massa, densidade, área de superfície e volume	21 DAS	Nour e Weibel (1978), Cherif-Ari et al. (1990), Omany (1994), Liang et al. (2017), Magalhães et al. (2016)
Câmara radicular	Ângulo nodal	21 DAS	Singh et al. (2010), Joshi et al. (2017)
Camada de cera e parafina	Habilidade de penetração	24 DAS	Price et al. (2000)
Minirhizotrons	Comprimento, volume, número e área	27 DAS	Parra-Londono et al. (2018)

Continua..

Tabela 1. Continuação

Método de fenotipagem	Característica avaliada	Estádio de fenotipagem	Referências
RootTrak (Tomografia computadorizada)	Profundidade máxima do sistema radicular e largura máxima do sistema radicular	95 DAS	Gomez et al. (2018)
Shovelomics	Número de raízes seminal e basal, ângulo nodal, ramificação e profundidade	Florescimento ou Maturação	Trachsel et al. (2011), Liang et al. (2017), Batista (2018)
Trincheira	Comprimento, ângulo, volume	Florescimento	Bohm (1979)
Line source/ tomografia elétrica	Absorção de água	Imposição do estresse 47 DAS. Avaliação 139 DAS	Srayeddin e Doussan (2009)
Monólito	Comprimento de raiz, massa seca	Florescimento	Redin et al. (2018)
Rhizobox	Biomassa, peso seco	35 DAS	Hylander (2006), Chu et al. (2016)
Tubetes de plástico/ Winrhizo	Volume, comprimento, diâmetro, massa seca, razão raiz/parte aérea	4 folhas	Hanson (2015), Julio et al. (2020)

Adaptado de: Joshi et al. (2016); DAS = dias após semeadura

Como visto na Tabela 1, várias características morfológicas podem ser avaliadas em sorgo visado tolerância à seca, sendo o ângulo nodal umas das mais estudadas. Raízes com ângulo mais estreito alcançam maior profundidade no solo, onde consequentemente haverá maior disponibilidade de água (Trachsel et al., 2011).

O sorgo possui uma única raiz seminal primária (Singh et al., 2010) que se origina como uma radícula no embrião e se torna visível apenas dois ou três dias após a germinação. As raízes pós-embrionárias emergem de nós

consecutivos no subsolo e acima do solo, e são chamadas de raízes nodais e adventícias, respectivamente. O ângulo nodal do sorgo aparece após 21 dias (estádio de cinco a seis folhas), não sendo possível sua avaliação antes disso. Vários QTLs associados a ângulo nodal já foram descritos na literatura, os quais podem contribuir para a seleção de genótipos para tolerância à seca.

Quatro QTLs para ângulo de raiz nodal (qRA1_5, qRA2_5, qRA1_8, qRA1_10), três QTLs para massa seca de raiz (qRDW1_2, qRDW1_5, qRDW1_8) e oito QTLs para volume de raiz, massa fresca de raiz e massa seca de raiz foram identificados por Mace et al. (2012) e Rajkumar et al. (2013). Além disso, um dos QTLs para ângulos da raiz está colocalizado com QTL para *stay-green* no sorgo e associado ao rendimento de grãos (Mace et al., 2012). Outros dois QTL (qRT6 e qRT7) associados a raízes adventícias foram mapeados no cromossomo 6 e 7 do sorgo (Li et al., 2014).

Singh et al. (2011) avaliaram a herança do ângulo da raiz nodal e da massa seca da raiz em um conjunto de 44 linhagens e 30 híbridos. Foi observado que ambas as características possuem controle poligênico, com herdabilidade moderada, e significativo efeito da capacidade específica de combinação.

Estratégias de Melhoramento para Tolerância à Seca

A mitigação dos impactos proporcionados pela seca pode ser obtida através da seleção de cultivares que apresentem desenvolvimento satisfatório em condições de estresse. Vale ressaltar que o estágio de crescimento da planta em que o estresse hídrico ocorre, assim como a intensidade e a duração dele, é muito importante para determinar a resposta do sorgo ao estresse. Para tanto, estratégias de melhoramento genético de plantas para tolerância à seca têm sido amplamente discutidas (Reddy et al., 2009; Tari et al., 2013).

Quatro abordagens básicas de melhoramento para tolerância à seca foram propostas:

1. Seleção para alto rendimento de grãos em condições ideais (ambiente favorável) e assumir que isso proporcionará uma vantagem adaptativa em condições subótimas (ambiente desfavorável).
2. Seleção para alto rendimento por meio de seleção empírica em campo no ambiente-alvo sob estresse controlado de seca.
3. Incorporar os mecanismos fisiológicos e/ou morfológicos que conferem

tolerância à seca em programas de melhoramento tradicionais.

4. Identificar características-chaves que conferem tolerância à seca em estádios de crescimento específicos e sua introgressão no germoplasma de alto rendimento.

Antes que qualquer estratégia seja definida é preciso avaliar a disponibilidade de variabilidade genética para caracteres associados à tolerância à seca para que a seleção seja eficiente. Para tanto, ter uma boa coleção de germoplasma é crucial para que fontes de tolerância sejam identificadas e utilizadas como doadores. Apesar de bancos de germoplasma serem particulares de cada empresa, alguns estudos identificaram importantes fontes para caracteres específicos relacionados à tolerância à seca, algumas dessas disponíveis no domínio público (Tabela 2).

Tabela 2. Fontes de germoplasma de sorgo tolerante à seca citados na literatura.

Estádio de crescimento	Germoplasma	Referência
Emergência das plântulas	IS 4405, IS 4663, IS 17595, IS 1037, VZM1-B, 2077B, IS 2877, IS 1045, D 38093, D 38060, ICSV 88050, ICSV 88065 e SPV 354	Vidyabhushanam et al.(1982), Reddy et al. (2004)
Plântulas novas	ICSB 3, SCSB 6, ICSB 11, ICSB 37, ICSB 54 e ICSB 88001	Vidyabhushanam et al.(1982), Reddy et al. (2004)
	80265, 80114, SS-95-4, SS-97-7 e 80377	Bibi et al. (2010)
Pré-florescimento	ICSV 378, ICSV 572, ICSB 58 e ICSB 196	Vidyabhushanam et al.(1982), Reddy et al. (2004)
	Tx7078, TAM 422, Tx7000, Tx430, BTx623, BTx3197, Tx2536, Tx2737, Tx432, P898012, P954035, SC23-14, SC103-14, SC414-12E, SC701-14, 1790E, 82BDM499, P37-3, P40-1, TngBrESw, Early Hegari, CSM-63, Ajabsido, Koro Kollo, Segalolone e El Mota	Rosenow et al. (1996)

Continua...

Tabela 2. Continuação

Estádio de crescimento	Germoplasma	Referência
Pós-florescimento	E 36-1, DJ 1195, DKV 4, DKV 17, DKV 18 e ICSB 17	Vidyabhushanam et al. (1982), Reddy et al. (2004)
	SC23-14, SC33-14, SC35-14, B35, SC38-14, SC56-14, SC237-14, SC265-14, SC328-14, SC599-14, SC599-6, SC701-14, SC1017-14, P898012, P954035, BKS9, KS19, Tx2908, 1790E, 1778, R1922, 88V1080, NSA440, Karper 669, csm-63, QL36 e BQL41	Rosenow et al. (1996)
	EG 885, EG 469, EG 481, EG 849, Hamelmalo, EG 836 e EG 711	Negash (2015)
	IS 23514 e Phule Chitra	Rakshit et al. (2016)

A seleção direta para tolerância à seca em sorgo é complexa e muitas vezes pouco eficiente e cara. Por isso, várias características morfofisiológicas ajudam na seleção indireta de materiais tolerantes. Caracteres como vigor de plântulas, capacidade de perfilhamento, período de maturação da cultura, plasticidade do desenvolvimento, presença de cera, número de grãos por panícula, massa de 1.000 grãos, índice de colheita, biomassa total, cobertura precoce do solo, eficiência no uso da água, condutância estomática, conteúdo de clorofila, temperatura do dossel, índice de estabilidade da membrana, índice de estabilidade, perfil de enraizamento, condutividade hidráulica das raízes, particionamento de fotoassimilados, mobilização de carboidratos e alterações nos níveis hormonais podem ser utilizados como características secundárias durante a seleção por meio de índices de seleção (Rakshit; Bellundagi, 2019; Batista, 2018; Oliveira et al., 2020).

Com o intuito de otimizar a seleção de genótipos de sorgo produtivos, estáveis e tolerantes à seca, índices de seleção foram propostos usando como referência o rendimento de grãos em ambientes com e sem estresse (Tabela 3). Os melhores índices são aqueles que: i) apresentam alta correlação com o rendimento de grãos em condições controle e de estresse hídrico e ii) apresentam coeficiente de variação baixo, o que possibilita a identificação de genótipos com alto rendimento e tolerância à seca (Farshadfar; Elyasi, 2012).

Tabela 3. Índices de seleção para tolerância à seca e fórmulas.

Índice	Fórmula	Referência
Produtividade média (MP)	$(*Y_{pi} + Y_{si}) / 2$	Rosielle e Hamblin (1981)
Desempenho relativo médio (MRP)	$(Y_{si}/Y_s) + (Y_{pi}/Y_p)$	Hossain et al. (1999)
Índice de suscetibilidade ao estresse (SSI)	$1 - (Y_{si}/Y_{pi}) / SI$, onde a intensidade do estresse $(SI) = 1 - (Y_s/Y_p)$	Fischer e Maurer (1978)
Índice de tolerância ao estresse (TOL)	$Y_{pi} - Y_{si}$	Rosielle e Hamblin (1981)
Produtividade média geométrica (GMP)	$\sqrt{Y_{pi} \times Y_{si}}$	Fernandez (1992)
Índice de eficiência relativa (REI)	$(Y_{si}/Y_s) * (Y_{pi}/Y_p)$	Hossain et al. (1999)
Índice de tolerância ao estresse (STI)	$(Y_{si} \times Y_{pi}) / (Y_p)^2$	Fernandez (1992)
Média harmônica de rendimento (HM)	$2 * (Y_{pi} * Y_{si}) / (Y_{pi} + Y_{si})$	Dadbakhsh et al. (2011)
Índice de sensibilidade à seca (SDI)	$(Y_{pi} - Y_{si}) / Y_{pi}$	Farshadfar e Javadinia (2011)
Índice relativo de seca (RDI)	$(Y_{si}/Y_{pi}) / (Y_s/Y_p)$	Fischer e Wood (1979)
Índice de resistência à seca (DI)	$Y_{si} \times (Y_{si}/Y_{pi}) / (Y_s)$	Lan (1998)
Índices modificados de tolerância ao estresse 1 (MSTik1)	$((Y_{pi})^2 / (Y_p)^2) \times STI$	Farshadfar e Sutka (2002)
Índices modificados de tolerância ao estresse 2 (MSTik2)	$((Y_{si})^2 / (Y_s)^2) \times STI$	Farshadfar e Sutka (2002)

* Y_{si} e Y_{pi} : produtividade de grãos para o genótipo i nas condições com e sem restrição hídrica, respectivamente; Y_s e Y_p : média da produtividade de grãos de todos os híbridos nas condições com e sem restrição hídrica, respectivamente.

Os índices GMP (produtividade média geométrica); MRP (desempenho relativo médio) e STI (Índice de susceptibilidade ao estresse) têm apresentado maior correlação com rendimento de grãos em ambas as condições de controle e estresse, assim como coeficientes de variação baixos,

que auxiliam a discriminar os genótipos (Menezes et al., 2015; Elmunsor, et al., 2014; Batista et al., 2019).

Entre as características mais trabalhadas no melhoramento para tolerância à seca estão o *stay-green* e caracteres do sistema radicular. As plantas que permanecem verdes e completam normalmente o estágio de enchimento de grãos são consideradas tolerantes, apresentando paralelamente resistência ao acamamento e à podridão-de-*Macrophomina* na maioria dos casos. O caule verde da planta também favorece a resistência ao acamamento e à podridão-de-carvão (Rosenow et al., 1996; Nguyen et al., 1997a; Xu et al., 2000).

A seleção para *stay-green* deve ser realizada com as plantas em um mesmo estágio de desenvolvimento, para garantir que a senescência tardia não seja por causa da baixa demanda de solutos (Borrell et al., 2014a), por exemplo, uma cultivar precoce em estágio de enchimento de grãos comparada a outra cultivar tardia em estágio vegetativo (sem competição entre planta e panícula). Esta última vai permanecer mais verde por mais tempo. Para introgressão do *stay-green* em materiais-elites pode-se usar retrocruzamento assistido por marcadores moleculares. O uso de QTLs associados ao *stay-green* pode acelerar os ganhos de seleção para esta característica. Tuinstra et al. (1998), usando NILs, encontraram associações positivas entre essas duas características, reforçando o potencial de seleção indireta com base em *stay-green* para melhorar a produtividade de grãos sob estresse hídrico em sorgo.

O índice de colheita da panícula mensurado em condições de estresse é um bom indicador da tolerância terminal à seca em sorgo. Em conjunto com o potencial de rendimento de grãos e precocidade, é responsável por grande parte da variação genotípica no rendimento de grãos sob estresse de seca pós-florescimento. O número de grãos por panícula e a massa de 1.000 grãos são componentes do rendimento, sendo muito afetados nas condições de seca pós-florescimento, levando a uma redução no índice de colheita da panícula (Santos et al., 2005).

Medidas fisiológicas, tais como potencial de água na folha e ajustamento osmótico, apresentam baixa correlação com diferenças em rendimento sob estresse. Esse fato pode levar frequentemente a uma situação na qual materiais mais suscetíveis, porém com potencial produtivo maior, superam materiais genéticos considerados tolerantes, mas com potencial produtivo mais baixo em condições de estresse hídrico (Magalhães; Durães, 2003). Sendo assim, essas medidas são pouco eficazes na seleção de

genótipos para este fim. Em condições em que é difícil medir a eficiência da transpiração e condutância estomática, o enrolamento das folhas é um bom indicador de tolerância à seca (Amelework et al., 2015).

A queima de folhas é considerada uma característica fenotípica simples que permite que grandes populações sejam avaliadas (Andrews et al., 1983).

A tolerância à desidratação é a característica mais difícil de trabalhar através do melhoramento convencional de plantas. As plântulas são submetidas a severos níveis de umidade e estresse térmico e, então, o dano à membrana pode ser avaliado pelo vazamento de eletrólitos (Blum; Ebercon, 1981). Zhang e Kirkham (1996a) descobriram que o teor de malondialdeído é um indicador de estresse hídrico.

Em pós-florescimento, o aumento da tolerância à desidratação, resultando no crescimento contínuo da folha e diminuição da senescência durante a seca leve ou moderada, pode ter um efeito positivo na produção agrícola. Para tanto, muitos programas utilizam a seleção para *stay-green* como forma de aumentar a tolerância à seca em sorgo.

Como a translocação é mais resistente ao déficit hídrico do que a fotossíntese e a respiração (Boyer, 1976), a capacidade de armazenar e mobilizar grandes quantidades de carboidratos, para o ajuste osmótico ou para enchimento de grãos sob seca pós-florescimento, deve melhorar a capacidade da cultivar de funcionar sob condições de seca (Bidinger et al., 1987). Tangpremsri et al. (1995) concluíram que o efeito adverso do estresse hídrico poderia ser reduzido selecionando-se genótipos de sorgo com alto ajuste osmótico. No entanto, nenhuma relação entre ajuste osmótico e crescimento ou produção em condições de campo (Blum et al., 1989) foi relatada, enquanto uma correlação negativa entre ajuste osmótico e produção foi relatada por Grumet et al. (1987).

Cultivares usadas na época de pós-chuva na Índia, como M35-1 e CSH 8, têm maior capacidade de diminuir seu potencial osmótico sob estresse do que a cultivar CSH6, que é plantada na estação chuvosa (Seetharama et al., 1982). Pouco progresso foi alcançado no melhoramento para tolerância à seca usando ajuste osmótico ou qualquer uma das outras características fisiológicas, em razão do entendimento limitado dessas características que conferem tolerância à seca e da dificuldade em procedimentos de avaliação.

O ácido abscísico (ABA) tem um papel importante na indução da mobilização de assimilados das folhas para os grãos após o florescimento

(Tietz et al., 1981). Em situações intermitentes de déficit de umidade, os carboidratos armazenados determinam a capacidade de um genótipo de se recuperar do estresse (Sheldrake; Narayanan, 1979).

Sob condições de estresse pós-florescimento, a fotossíntese líquida diminui, e a proporção de translocação de carboidratos solúveis armazenados para enchimento de grãos torna-se maior (Fischer, 1979). Embora o acúmulo de níveis mais altos de reservas de carboidratos não estruturais durante o estágio de pré-florescimento seja vantajoso, isso envolve uma penalidade para o potencial de rendimento sob condições ideais e leva à limitação da translocação. Essa translocação também predispõe o caule a infecções fúngicas ou acamamento, causando enfraquecimento do caule, como a podridão-do-carvão no sorgo (*Macrophomina phaseolina*) (Rosenow et al., 1983).

Raio X com espectrometria de fluorescência foi usado para determinar as concentrações de elementos químicos em variedades tolerantes e suscetíveis, em estágio de *seedlings* e no grão seco de sorgo. Na avaliação em estágio de *seedlings*, a concentração de Fe diminuiu no grupo tolerante e aumentou no grupo suscetível, conforme a planta ia envelhecendo. Já no grão seco, genótipos tolerantes à seca mostraram maiores concentrações de K e Fe (Abu Assar et al., 2002). Potássio tem papel na regulação dos estômatos, que é um dos principais mecanismos de controle do regime hídrico das plantas. K também atua como um soluto somático predominante nos vacúolos, mantendo um alto nível de água nos tecidos, mesmo em condições de seca.

A utilidade da tolerância à desidratação pode ser percebida apenas se for colocada em um material genético que tenha outros mecanismos relacionados à manutenção da produção em ambientes com déficit hídrico. Gaosegelwe e Kirkham (1990) sugeriram que o potencial de água na folha pode ser usado como uma maneira fácil e rápida de selecionar genótipos de sorgo para evitar a seca.

Na Tabela 4 são apresentados alguns métodos de avaliação de plantas de sorgo visando a seleção para tolerância à seca. O grande objetivo destes métodos é reduzir a mão de obra e aumentar o número de plantas a serem avaliadas no programa. Uma forma de reduzir o tempo é avaliando as plantas o mais cedo possível, porém muitas características avaliadas em estágio de plântula não possuem alta correlação com rendimento de grãos, servindo somente como forma de *screening* inicial para eliminar genótipos mais suscetíveis.

Tabela 4. Alguns métodos usados para avaliação de tolerância à seca em sorgo

Método	Característica avaliada	Época de avaliação	Referência
Polietilenoglicol (PEG 6000 ou 8000)	Indução de calo in vitro	quatro semanas após incubação	Smith et al. (1985), Singh e Chaudhary (1998), Tsago et al. (2013, 2014)
Polietilenoglicol (PEG 6000)	Comprimento e massa fresca da parte aérea, comprimento e massa fresca e seca da raiz	14 DAS	Bibi et al. (2012)
	Tamanho, forma e ajuste osmótico do grão de pólen	24 horas após	Patil e Ravikumar (2011)
Manitol	Germinação, Potencial osmótico do embrião e endosperma	14 h após geminação	Gill et al. (2002)
Solução de 0,3% de iodeto de potássio	Senescência e abscisão foliar	Plântula	Singh e Chaudhary, (1998)
30 minutos em alta temperatura	<i>Stay-green</i> , sacarose	Florescimento	Burke et al. (2010)
Extração de cera da planta	Cera epicuticular	63 DAS	Premachandra et al. (1993)
Tanque com areia e carvão	Emergência	6 DAS	Reddy (1985)
	Comprimento do mesocótilo	5 DAG	Reddy et al. (2005)

Continua...

Tabela 4. Continuação

Método	Característica avaliada	Época de avaliação	Referência
Vasos em casa de vegetação	Recuperação de plântulas	24 DAG	Reddy (1985), Reddy et al. (2005)
	Condutância estomática, potencial osmótico, pressão de turgor, comprimento do caule e comprimento da raiz	10 DAS	Bibi et al. (2010)
	K, Fe, Zn, Cu, Ni, Rb e Si	5 DAG 60 DAG	Abu Assar et al. (2002)
	Prolina	32 DAS	Waldren e Teare, (1974) Sivaramakrishnan et al. (2006)
Em campo – pré-florescimento	Produção de grãos, <i>stay-green</i> , índice de clorofila, ângulo de raiz	21 dias após o estresse	Reddy et al. (2005), Batista (2018), Souza et al. (2020)
Em campo – pós-florescimento	Produção de grãos, <i>stay-green</i> , índice de clorofila, ângulo de raiz, condutância estomática, conteúdo de clorofila, área foliar, índice de trilha	Colheita (< 18% de umidade do grão)	Reddy et al. (2005), Batista (2018), Souza et al. (2020), Oliveira et al. (2020)
Em campo - Simulação com desseccante	Produção de grãos; massa de grãos	14 DAF	Ongom et al. (2016)

DAS: dias após semeadura. DAG: dias após germinação. DAF: dias após florescimento.

Para seleção de genótipos de sorgo tolerantes ao estresse hídrico deve-se considerar a imprevisibilidade do ambiente durante o cultivo. Dessa forma, é de grande importância a avaliação em diferentes ambientes para possibilitar a identificação dos genótipos mais adaptados e estáveis. Outra dificuldade encontrada nas avaliações em campo é a significativa interação entre genótipos e anos de avaliação, a qual muitas vezes foi maior do que a interação entre genótipos e condições de estresse, mostrando que fatores do

clima são importantes na manifestação fenotípica do caráter tolerância à seca em sorgo (Menezes et al., 2015; Batista et al., 2017).

O programa de melhoramento de sorgo da Embrapa trabalha com seleção para tolerância a seca em pós-florescimento, que possui mais correlação com o que ocorre na segunda safra. Para tanto, dois sítios de fenotipagem foram desenvolvidos, um na Fazenda do Gortuba, em Nova Porteirinha-MG, e outra na Embrapa Meio Norte, em Teresina-PI. A escolha desses locais se dá em função da concentração do período chuvoso, que geralmente ocorre de novembro a abril, no primeiro, e de dezembro a maio no segundo sítio. Uma vez que a estação seca é bem definida entre os meses de maio a outubro, isso favorece a condução de ensaios de tolerância à seca, porque o fornecimento de água durante a condução do experimento é realizado apenas pela irrigação (Menezes et al., 2015; Batista, 2018). As lâminas de irrigação nos ensaios com estresse hídrico em pós-florescimento e nos ensaios sem estresse são de aproximadamente 330 mm e 600 mm, respectivamente.

Para avaliação em pré-florescimento, a irrigação é interrompida três semanas após a germinação por um período de 30 a 45 dias (Reddy et al., 2006; Batista, 2018). Se o local de avaliação é muito quente, como em Teresina-PI, quando comparado a Nova Porteirinha-MG, o estresse costuma ser mais severo podendo reduzir ou cessar a formação de grãos. Então o ideal é que o pesquisador conheça bem seu sítio de fenotipagem para decidir quantos dias este estresse deva ser imposto.

Para avaliação em pós-florescimento, a irrigação é cortada na fase de emborrachamento das plantas (E6), podendo retornar ou não, dependendo da temperatura e umidade da região. Nas avaliações de campo em Nova Porteirinha-MG, não há necessidade de retorno da irrigação. Algumas vezes em Teresina-PI é necessário fazer uma irrigação de sobrevivência, mesmo nos ensaios de seca para que a redução do rendimento de grãos não passe de 50%, quando comparada ao ensaio sem estresse.

O uso de todas as características descritas anteriormente pode aumentar o ganho genético nos programas de melhoramento de sorgo (Prasad et al., 2006; Borell et al., 2010). Todavia, vale ressaltar que a tolerância à seca em sorgo é extremamente complexa por causa da rede virtualmente infinita de possíveis interações entre genética, mecanismos fisiológicos e ambiente. Por isso, na seleção para tolerância à seca nunca se deve utilizar uma característica isoladamente.

Referências

- ABU ASSAR, A. H.; JOSEPH, D.; SUPRASANNA, P.; CHOUDHURY, R. K.; SAXENA, A.; BAPAT, V. A. Study of trace element correlations with drought tolerance in different sorghum genotypes using energy dispersive X-ray fluorescence technique. **Biological Trace Element Research**, v. 85, article 255, 2002.
- ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; LENG, E. R. Water management. In: ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; LENG, E. R. **Modern corn production**. 2. ed. Champaign: A & L Publication, 1982. p. 189.
- ALI, M. A.; ABBAS, A.; NIAZ, S.; ZULKIFFAL, M.; ALI, S. Morpho-physiological criteria for drought tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor*) at seedling and post-anthesis stages. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 11, n. 6, p. 674-680, 2009.
- AL-NAGGAR, A. M. M.; EL-KADI, D. A.; ABO-ZAID, Z. S. H. Genetic analysis of drought tolerance traits in sorghum. **Egyptian Journal of Plant Breeding**, v. 11, n. 3, p. 207-232, 2007.
- AMELEWORK, B.; SHIMELIS, H.; TONGOONA, P.; LAING, M. Physiological mechanisms of drought tolerance in sorghum, genetic basis and breeding methods: a review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 31, p. 3029-3040, 2015.
- ANDREWS, D. J.; REDDY, B. V. S.; TALUKDAR, B. S.; REDDY, L. J.; SAXENA, N. P.; SAXENA, K. B. Breeding for drought resistance. In: HOUSE symposium on drought resistance. Patancheru: ICRISAT, 1983. p. 1-14.
- ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S. A.; PRASAD, V. P. V. Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: a review. **Crop Management**, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2010.
- AWIKA, H. O.; HAYS, D. B.; MULLET, J. E.; ROONEY, W. L.; WEERS, B. D. QTL mapping and loci dissection for leaf epicuticular wax load and canopy temperature depression and their association with QTL for staygreen in *Sorghum bicolor* under stress. **Euphytica**, v. 213, article 207, 2017.

BATISTA, P. S. C. **Tolerância ao estresse hídrico em sorgo granífero.** 2018. 90 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

BATISTA, P. S. C.; FERNANDES, J. S. C.; PORTUGAL, A. F.; CANGUSSÚ, L. V. de S.; JULIO, M. P. M.; MENEZES, C. B. de. Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 379-395, 2019.

BATISTA, P. S. C.; MENEZES, C. B.; CARVALHO, A. J.; PORTUGAL, A. F.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; SANTOS, C. V.; JULIO, M. P. M. Performance of grain sorghum hybrids under drought stress using GGE biplot analyses. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 3, p. 1-12, 2017.

BAWAZIR, A. A.; IDLE, D. B. Drought resistance and root morphology in sorghum. **Plant and Soil**, v. 119, p. 217-221, 1989.

BIBI, A.; SADAQAT, H. A.; AKRAM, H. M.; MOHAMMED, M. I. Physiological markers for screening sorghum (*Sorghum bicolor*) germplasm under water stress condition. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 12, n. 3, p. 451-455, 2010.

BIBI, A.; SADAQAT, H. A.; TAHIR, M. H. N.; AKRAM, H. M. Screening of sorghum (*Sorghum bicolor* var Moench) for drought tolerance at seedling stage in polyethylene glycol. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 22, n. 3, p. 671-678, 2012.

BIDINGER, F. R.; MAHALAKSHMI, V.; RAO, G. D. P. Assessment of drought resistance in pearl millet (*Pennisetum americanum* L. Leeke) II. Estimation of genotype response to stress. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 38, n. 1, p. 49-59, 1987.

BITTMAN, S.; SIMPSON, G. M. Drought effect on leaf conductance and leaf rolling in forage grasses. **Crop Science**, v. 29, n. 2, p. 338-344, 1989.

BLUM, A. Genetic improvement of drought resistance in crop plants: a case for sorghum. In: MUSSELL, H.; STAPLES, R. C. (ed.). **Stress physiology in crop plants**. New York: John Wiley, 1979. p. 429-445.

BLUM, A. Sorghum physiology. In: NGUYEN, H. T.; BLUM, A. (ed.). **Physiology and biotechnology integration for plant breeding**. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 141-223.

BLUM, A.; EBERCON, A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. **Crop Science**, v. 21, n. 1, p. 43-47, 1981.

BLUM, A.; MAYER, J.; GOLAN, G. Agronomic and physiological assessments of genotypic variation for drought resistance in sorghum. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 40, n. 1, p. 49-61, 1989.

BLUM, A.; GOLAN, G.; MAYER, J.; SINMENA, B.; OBILANA, T. Comparative productivity and drought response of semi-tropical hybrids and open-pollinated varieties of sorghum. **Journal of Agricultural Science**, v. 118, n. 1, p. 29-36, 1992.

BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979. 189 p.

BORELL, A. K.; HAMMER, G. L.; DOUGLAS, A. C. L. Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? I. Leaf growth and senescence. **Crop Science**, v. 40, n. 4, p. 1026-1037, 2010.

BORRELL, A. K.; MULLET, J. E.; GEORGE-JAEGGLI, B.; OOSTEROM, E. J. van; HAMMER, G. L.; KLEIN, P. E.; JORDAN, D. R. Drought adaptation of stay-green sorghum is associated with canopy development, leaf anatomy, root growth, and water uptake. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 21, p. 6251-6263, 2014a.

BORRELL, A. K.; OOSTEROM, E. J.; MULLET, J. E.; GEORGE-JAEGGLI, B.; JORDAN, D. R.; KLEIN, P. E.; HAMMER, G. L. Stay-green alleles individually enhance grain yield in sorghum under drought by modifying canopy development and water uptake patterns. **New Phytologist**, v. 203, n. 3, p. 817-830, 2014b.

BOYER, J. S. Photosynthesis at low water potentials. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 273, n. 927, p. 501-512, 1976.

BURKE, J. J.; FRANKS, C. D.; BUROW, G.; XIN, Z. Selection system for the stay-green drought tolerance trait in sorghum germplasm. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 4, p. 1118-1122, 2010.

CHERIF-ARI, O.; HOUSLEY, T. L.; EJETA, G. Sorghum root length density and the potential for avoiding *Striga* parasitism. **Plant and Soil**, v. 121, p. 67-72, 1990.

CRASTA, O. R.; XU, W. W.; ROSENOW, D. T.; MULLET, J.; NGUYEN, H. T. Mapping of post-flowering drought resistance traits in grain sorghum: association between QTLs influencing premature senescence and maturity. **Molecular and General Genetics**, v. 262, p. 579-588, 1999.

CHU, Q.; SHA, Z.; NAKAMUTA, T.; OKA, N.; OSAKI, M.; WATANABE, T. Differential responses of soybean and sorghum growth, nitrogen uptake, and microbial metabolism in the rhizosphere to cattle manure application: a rhizobox study. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 43, p. 8084-8094, 2016.

DADBAKHS, A.; YAZDANSEPAS, A.; AHMADIZADEH, M. Study drought stress on yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes by drought tolerance indices. **Advances in Environmental Biology**, v. 5, n. 7, p. 1804-1810, 2011.

DOGGETT, H. Physiology and agronomy. In: DOGGETT, H. **Sorghum**. London: Longmans, 1970. p. 180-211.

ELMUNSOR, I. I.; IDRIS, A. E.; HAMZA, N. B.; ABUALI, A. I. Screening of grains sorghum genotypes under drought stress conditions using some stress tolerance indices. **Advances in Environmental Biology**, v. 8, n. 10, p. 27-30, 2014.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p. 185-212, 2009.

FARSHADFAR, E.; ELYASI, P. Screening quantitative indicators of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces. **European Journal of Experimental Biology**, v. 2, n. 3, p. 577- 584, 2012.

- FARSHADFAR, E.; JAVADINIA, J. Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes for drought tolerance. **Seed and Plant Improvement Journal**, v. 27, n. 4, p. 517-537, 2011.
- FARSHADFAR, E.; SUTKA, J. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. **Cereal Research Communications**, v. 31, n. 1/2, p. 33-39, 2002.
- FERNANDEZ, G. C. J. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In: KUO, C. G. (ed.). **Adaptation of food crops to temperature and water stress**. Shanhua: Asian Vegetable Research and Development Center, 1992. p. 257-270. (Taiwan Publication, v. 93).
- FISCHER, R. A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 29, n. 5, p. 897-912, 1978.
- FISCHER, R. A.; WOOD, J. T. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 30, n. 6, p. 1001-1020, 1979.
- FISCHER, R. A. Growth and water limitation to dryland wheat yield in Australia: a physiological framework. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, v. 45, n. 2, p. 83-94, 1979.
- FRACASSO, A.; TRINDADE, L. M.; AMADUCCI, S. Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE. **BMC Plant Biology**, v.16, article 115, 2016.
- GAOSEGELWE, P. L.; KIRKHAM, M. B. Evaluation of wild, primitive, and adapted sorghums for drought resistance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DRYLAND FARMING, Amarillo/Bushland, Texas, 1988. **Challenges in dry land agriculture: a global perspective: proceedings**. College Station: Texas Agricultural Experiment Station, 1990. p. 224-226.

GILL, R. K.; SHARMA, A. D.; SINGH, P.; BHULLAR, S. S. Osmotic stress induced changes in germination, growth and soluble sugar content of *Sorghum bicolor* (L.) Moench seeds. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, v. 28, n. 2/4, p. 12-25, 2002.

GOMEZ, F. E.; CARVALHO JR.; G. A.; SHI, F.; MULIANA, A. H.; ROONEY, W. High throughput phenotyping of morpho-anatomical stem properties using X-ray computed tomography in sorghum. **Plant Methods**, v. 14, article 59, 2018.

GRUMET, R.; ALBRECHTSEN, R. S.; HANSON, A. D. Growth and yield of barley isopopulations differing in solute potential. **Crop Science**, v. 27, n. 5, p. 991-995, 1987.

HANSON, A. Evaluating physiological responses of ten alfalfa (*Medicago sativa* subsp. *falcata*) germplasm to drought treatments. **The Journal of Undergraduate Research**, v. 13, p. 124-137, 2015.

HARRIS, K.; SUBUDHI, P. K.; BORRELL, A.; JORDAN, D.; ROSENOW, D.; NGUYEN, H.; KLEIN, P.; KLEIN, R.; MULLET, J. Sorghum stay-green QTL individually reduce post-flowering drought-induced leaf senescence. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 327-338, 2007.

HASH, C. T.; BHASKERRAJ, A. G.; LINDUP, S.; SHARMA, A.; BENIWAL, C. R.; FOLKERTSMA, R. T.; MAHALAKSHMI, V.; ZERBINI, E.; BLUMMEL, M. Opportunities for marker-assisted selection (MAS) to improve the feed quality of crop residues in pearl millet and sorghum. **Field Crops Research**, v. 84, n. 1/2, p. 79-88, 2003.

HAUSSMANN, B. I. G.; MAHALAKSHMI, V.; REDDY, B. V. S.; SEETHARAMA, N.; HASH, C. T.; GEIGER, H. H. QTL mapping of stay-green in two sorghum recombinant inbred populations. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 106, n. 1, p. 133-142, 2002.

HECKATHORN, S. A.; DELUCIA, E. H. Effect of leaf rolling on gas exchange and leaf temperature of *Andropogon gerardii* and *Spartina pectinata*. **Botanical Gazette**, v. 152, n. 3, p. 263-268, 1991.

HENZELL, R. G.; BRENGMAN, R. L.; FLETCHER, D. S.; MCCOSKER, A. N. Relationship between yield and non-senescence (stay green) in some grain sorghum hybrids grown under terminal drought stress. In: AUSTRALIAN SORGHUM CONFERENCE, 2., 1992, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: Australian Institute of Agricultural Science, 1992. p. 355-358.

HOSSAIN, A. B. S.; SEARS, A. G.; COX, T. S.; PAULSEN, G. M. Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. **Crop Science**, v. 30, n. 3, p. 622-627, 1999.

HYLANDER, L. D. Improvements of rhizoboxes used for studies of soil-root interactions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 1/2, p. 155-161, 2006.

JORDAN, W. R.; MONK, R. L.; MILLER, F. R.; ROSENOW, D. T.; CLARK, L. E.; SHOUSE, P. J. Environmental physiology of sorghum. I. Environmental and genetic control of epicuticular wax load. **Crop Science**, v. 23, n. 3, p. 552-558, 1983.

JORDAN, W. R.; SHOUSE, P. J.; BLUM, A.; MILLER, F. R.; MONK, R. L. Environmental physiology of sorghum. II. Epicuticular wax load and cuticular transpiration. **Crop Science**, v. 24, n. 6, p. 1168-1173, 1984.

JORDAN, W. R.; SULLIVAN, C. Y. Reaction and resistance of grain sorghum to head and drought. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM, 1981, Patancheru. **Sorghum in the eighties: proceedings**. Patancheru: ICRISAT, 1982, p. 131-142.

JOSHI, D.; SINGH, V.; OOSTEROM, E. van; MACE, E.; JORDAN, D.; HAMMER, G. Genetic manipulation of root system architecture to improve drought adaptation in sorghum. In: RAKSHIT, S.; WANG, Y. (Ed.). **The sorghum genome**. Switzerland: Springer, 2016. p. 207-226.

JOSHI, D. C.; SINGH, V.; HUNT, C.; MACE, E.; OOSTEROM, E. van; SULMAN, R.; JORDAN, D.; HAMMER, G. Development of a phenotyping platform for high throughput screening of nodal root angle in sorghum. **Plant Methods**, v. 13, article 56, 2017.

JULIO, M. H. M.; MENEZES, C. B. de; JULIO, B. H. M.; SANTOS, C. V.; CARVALHO, E. dos R. L.; MAGALHÃES, P. C. Morfologia radicular em plântulas de sorgo sob condições com e sem déficit hídrico. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC/CNPq, 18., 2020, Sete Lagoas. [**Trabalhos apresentados**]. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/216343/1/Morfologia-radicular.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2021.

KADIOGLU, A.; TERZI, R. A dehydration avoidance mechanism: leaf rolling. **Botanical Review**, v. 73, p. 290-302, 2007.

KAPANIGOWDA, M. H. **Quantitative Trait Locus (QTL) mapping of transpiration efficiency related to pre-flower drought tolerance in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]**. 2011. Tese (Doutorado) - Texas A&M University, College Station, 2011.

KASSAHUN, B.; BIDINGER, F. R.; HASH, C. T.; KURUVINASHETTI, M. S. Staygreen expression in early generation sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] QTL introgression lines. **Euphytica**, v. 172, p. 351-362, 2009.

KEBEDE, H.; SUBADHI, P. K.; ROSENOW, D. T.; NGUYEN, H. T. Quantitative trait loci influencing drought tolerance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 103, p. 266-276, 2001.

KIMBER, C. T. Origins of domesticated sorghum and its early diffusion to India and China. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. (ed.). **Sorghum: origin, history, technology and production**. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 3-99.

KRUPA, K. N.; DALAWAI, N.; SHASHIDHAR, H. E.; HARINIKUMAR, K. M.; MANOJKUMAR, H. B.; BHARANI, S.; TURAIDAR, V. Mechanisms of drought tolerance in sorghum: a review. **International Journal of Pure and Applied Bioscience**, v. 5, n. 4, p. 221-237, 2017.

KUMAR, A.; BERNIER, J.; VERULKAR, S.; LAFITTE, H. R.; ATLIN, G. N. Breeding for drought tolerance: direct selection for yield, response to selection and use of drought tolerant donors in upland and lowland-adapted populations. **Field Crop Research**, v. 107, n. 3, p. 221-231, 2008.

LAN, J. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. **Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica**, v. 7, p. 85-87, 1998.

LI, R.; HAN, Y.; LV, P.; DU, R.; LIU, G. Molecular mapping of the brace root traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Breeding Science**, v. 64, n. 2, p. 193-198, 2014.

LIANG, X.; ERICKSON, J. E.; VERMERRIS, W.; ROWLAND, D. L.; SOLLENBERGER, L. E.; SILVEIRA, M. L. Root architecture of sorghum genotypes differing in root angles under different water regimes. **Journal of Crop Improvement**, v. 31, n. 1, p. 39-55, 2017.

LIU, X.; ZHENG, Z.; TAN, Z.; LI, Z.; HE, C.; LIU, D.; ZHANG, G.; LUO, Y. QTL mapping for controlling anthesis-silking interval based on RIL population in maize. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 7, p. 950-955, 2010.

LUDLOW, M. M. Physiological mechanisms of drought resistance. In: SYMPOSIUM ON APPLICATION AND PROSPECTS OF BIOTECHNOLOGY, 1992, Lubbock, Texas. **Proceedings...** Austin: University of Texas, 1993. p. 11-34.

LUDLOW, M. M.; MUCHOW, R. C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. **Advances in Agronomy**, v. 43, p. 107-153, 1990.

MACE, E.; SINGH, V.; OOSTEROM, E. van; HAMMER, G.; HUNT, C.; JORDAN, D. QTL for nodal root angle in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) co-locate with QTL for traits associated with drought adaptation. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 124, p. 97-109, 2012.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Ecofisiologia da produção de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 87).

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. de; LAVINSKY, A O.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; OLIVEIRA, L. L. de; CASTRO, E. M. de. Phenotypic plasticity of root system and shoots of *Sorghum bicolor* under different soil water levels during pre-flowering stage. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 1, p. 81-87, 2016.

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C. de; LAVINSKY, A. O. Fisiologia da produção. In: FILHO, I. A. P.; RODRIGUES, J. A. S. **Sorgo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 27-40. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

MARTIN, J. H. The comparative drought resistance of sorghum and corn. **Agronomy Journal**, v. 22, n. 12, p. 993-1003, 1930.

MARTINS, S.; BRITO, G. G.; GONÇALVES, W. C.; TRIPODE, B. M. D.; LARTAUD, M.; DUARTE, J. B.; MORELLO, C. L.; GIBAND, M. PhenoRoots: an inexpensive non-invasive phenotyping system to assess the variability of the root system architecture. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 5, e20180420, 2020.

MENEZES, C. B. de; RIBEIRO, A. da S.; TARDIN, F. D.; CARVALHO, A. J. de; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; PORTUGAL, A. F.; SILVA, K. J. da; SANTOS, C. V. dos; ALMEIDA, F. H. L. de. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de sorgo em ambientes com e sem restrição hídrica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 101-115, 2015.

MORGAN, J. M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 35, p. 299-319, 1984.

MUTAVA, R. N.; PRASAD, P. V. V.; TUINSTRA, M. R.; KOFOID, K. D.; YU, J. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crops Research**, v. 123, n. 1, p. 10-18, 2011.

NEGASH, T. A. **Genetic diversity and post flowering drought tolerance analysis of Eritrean sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench] landraces using morpho-physiological and molecular markers**. 2015. 179 f. Tese (Doutorado) - Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, Juja, Quênia, 2015.

NGUYEN, H. T.; BABU, R. C.; BLUM, A. Breeding for drought resistance in rice: physiology and molecular genetics considerations. **Crop Science**, v. 37, n. 5, p. 1426-1434, 1997a.

NGUYEN, H. T.; XU, W.; ROSENOW, D. T.; MULLET, J. E.; McINTYRE, L. Use by biotechnology in sorghum drought resistance breeding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENETIC IMPROVEMENT OF SORGHUM AND PEARL MILLET, 1996, Lubbock, Texas. **Proceedings...** Cali: INTSORMIL/ ICRISAT, 1997b. p. 412-424.

NOUR, A. M.; WEIBEL, D. E. Evaluation of root characteristics in grain sorghum. **Agronomy Journal**, v. 70, n. 2, p. 217-218, 1978.

OLIVEIRA, R. M. de; ASPIAZÚ, I.; MAGALHÃES, P. C.; SILVA, K. M. de J.; CARVALHO, A. J. de; PORTUGAL, A. F.; SANTOS, S. R. dos; REIS, J. B. R. da S. Agronomic and physiological indicators for selection of water restriction-tolerant grain sorghum genotypes. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.19, e1164, 2020.

OMANYA, G. O. **Evaluation of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moenc] cultivars for drought resistance**. 1994. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Nairobi, Nairobi, 1994.

ONGOM, P. O.; VOLENEC, J. J.; EJETA, G. Selection for drought tolerance in sorghum using desiccants to simulate post-anthesis drought stress. **Field Crops Research**, v. 198, p. 312-321, 2016.

OOSTEROM, E. J. van; JAYACHANDRAN, R.; BIDERGER, F. R. Diallel analysis of the stay-green trait and its components in sorghum. **Crop Science**, v. 36, n. 3, p. 549-555, 1996.

PARRA-LONDONO, S.; KAVKA, M.; SAMANS, B.; SNOWDON, R.; WIECKHORST, S.; UPTMOOR, R. Sorghum root-system classification in contrasting P environments reveals three main rooting types and root-architecture-related marker-trait associations. **Annals of Botany**, v. 121, n. 2, p. 267-280, 2018.

PATIL, B. S.; RAVIKUMAR, R. L. Osmotic adjustment in pollen grains: a measure of drought adaptation in sorghum? **Current Science**, v. 10, n. 3, p. 377-382, 2011.

PRASAD, P. V. V.; BOOTE, K. J.; ALLEN, L. H. Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield, and harvest index of grain sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 3/4, p. 237-251, 2006.

PREMACHANDRA, G. S.; HAHN, D. T.; ANDJOLY, R. A simple method for determination of abaxial and adaxial epicuticular wax loads in intact leaves of *Sorghum bicolor* L. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 73, p. 521-524, 1993.

PRICE, A. H.; STEELE, K. A.; MOORE, B. J.; BARRACLOUGH, P. B.; CLARK, L. J. A combined RFLP and AFLP linkage map of upland rice used to identify QTLs for root-penetration ability. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 100, p. 49-56, 2000.

RAJKUMAR, F. B.; KAVIL, S. P.; GIRMA, Y.; ARUN, S. S.; DADAKHALANDAR, D.; GURUSIDDESH, B. H.; PATIL, A. M.; THUDI, M.; BHAIAPPANAVAR, S. B.; NARAYANA, Y. D.; KRISHNARAJ, P. U.; KHADI, B. M.; KAMATAR, M. Y. Molecular mapping of genomic regions harbouring QTLs for root and yield traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Physiology and Molecular Biology Plants**, v. 19, n. 3, p. 409-419, 2013.

RAKSHIT, S.; SWAPNA, M.; DALAL, M.; SUSHMA, G.; GANAPATHY, K. N.; DHANDAPANI, A.; KARTHIKEYAN, M.; TALWAR, H. S. Post-flowering drought stress response of post-rainy sorghum genotypes. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 1, p. 8-14, 2016.

RAKSHIT, S.; BELLUNDAGI, A. Conventional breeding techniques in sorghum. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI V. A. (ed.). **Breeding sorghum for diverse end uses**. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 77-91.

RAMA REDDY, N. R.; MADHUSUDHANA, R.; MURALI MOHAN, S.; SEETHARAMA, N.; PATIL, J. V. Detection and validation of stay-green QTL in postrainy sorghum involving widely adapted cultivar, M35e1 and a popular stay-green genotype B35. **BMC Genomics**, v. 15, article 909, 2014.

REDDY, B. V. S. **Breeding of grain sorghums for adaptation to specific drought situations**. Bogotá: IICA; Brasília, DF: Embrapa, 1985. 83 p. Relatório final de consultoria.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S.; KUMAR, A. A. Genetic enhancement for drought tolerance in sorghum. **Plant Breeding Reviews**, v. 31, p. 189-222, 2009.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. Sorghum genetic resources, cytogenetics, and improvement. In: SINGH, R. J.; JAUHAR, P. P. (ed.). **Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement**. New York: CRC Press, 2006. v. 2, p. 309-363.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; REDDY, P. S. Sorghum breeding research at ICRISAT: goals, strategies, methods and accomplishments. *International Sorghum and Millets Newsletter*, v. 45, p. 5-12, 2004.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; SANJANA REDDY, P.; RAMAIAH, B. Genetic options for drought management in sorghum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CROP PRODUCTION IN STRESS ENVIRONMENTS, 2005, Jabalpur, India. **Management and genetic options**. Jabalpur: [s.n.], 2005. p. 59-84.

REDDY, P. S.; PATIL, J. V. **Genetic enhancement of rabi sorghum: adapting the Indian Durras**. London: Academic Press, 2015. 340 p.

REDIN, M.; RECOUS, S.; AITA, C.; CHAVES, B.; PFEIFER, I. C.; BASTOS, L. M.; PILECCO, G. E.; GIACONMINI, S. J. Root and shoot contribution to carbon and nitrogen inputs in the topsoil layer in no-tillage crop system under subtropical conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170355, 2018.

ROHÁČEK, K.; SOUKUPOVA, J.; BARTAK, M. Chlorophyll fluorescence: a wonderful tool to study plant physiology and plant stress. In: SCHOEFS, B. (ed.). **Plant cell compartments: selected topics**. Kerala: Research Signpost, 2008. p. 41-104.

ROSENOW, D. T.; EJETA, G.; CLARK, L. E.; GILBERT, M. L.; HENZELL, R. G.; BORRELL, A. K.; MUCHOW, R. C. Breeding for pre- and post-flowering drought stress resistance in sorghum. In: ROSENOW, D. (ed.). **The international conference on genetic improvement of sorghum and millet**. Lubbock: INTSORMIL, 1996. p. 400-424.

ROSENOW, D. T.; QUISENBERRY, J. E.; WENDT, C. W. Drought tolerant sorghum and cotton germplasm. **Agricultural Water Management**, v. 7, n. 1/3, p. 207-222, 1983.

ROSIELLE, A. A.; HAMBLIN, J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. **Crop Science**, v. 21, n. 6, p. 943-946, 1981.

SABADIN, P. K.; MALOSETTI, M.; BOER, M. P.; TARDIN, F. D.; SANTOS, F. G.; GUIMARÃES, C. T.; GOMIDE, R. L.; ANDRADE, C. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; CANIATO, F. F.; MOLLINARI, M.; MARGARIDO, G. R. A.; OLIVEIRA, B. F.; SCHAFFERT, R. E.; GARCIA, A. A. F.; VAN EEUWIJK, F. A.; MAGALHÃES, J. V. Studying the genetic basis of drought tolerance in sorghum by managed stress trials and adjustments for phenological and plant height differences. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 124, p. 1389-1402, 2012.

SANCHEZ, A. C.; SUBUDHI, P. K.; ROSENOW, D. T.; NGUYEN, H. T. Mapping QTL associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 713-726, 2002.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. (Org.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. v. 1, p. 429-466.

SEETHARAMA, N.; REDDY, B. V. S.; PEACOCK, J. M.; BIDERGER, F. R. **Sorghum improvement for drought resistance in drought resistance in crops with emphasis on rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1982. p. 317-338.

SHEHZAD, T.; OKUNO, K. Diversity assessment of sorghum germplasm and its utilization in genetic analysis of quantitative traits. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 6, p. 937-944, 2014.

SHELDRAKE, A. R.; NARAYANAN, A. Growth, development and nutrient uptake in pigeonpeas (*Cajanus cajan*). **Journal of Agricultural Science**, v. 92, n. 3, p. 513-526, 1979.

SINGH, B. L.; CHAUDHARY. The physiology of drought tolerance in field crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 41-56, 1988.

SINGH, V.; OOSTEROM, E. J. van; JORDAN, D. R.; HUNT, C. H.; HAMMER, G. L. Genetic variability and control of nodal root angle in sorghum. **Crop Science**, v. 51, p. 2011-2020, 2011.

SINGH, V.; OOSTEROM, E. J. van; JORDAN, D. R.; MESSINA, C. D.; COOPER, M.; HAMMER, G. L. Morphological and architectural development of root systems in sorghum and maize. **Plant and Soil**, v. 333, p. 287-299, 2010.

SINGH, V.; OOSTEROM, E. J. van; JORDAN, D. R.; HAMMER, G. L. Genetic control of nodal root angle in sorghum and its implications on water extraction. **European Journal of Agronomy**, v. 42, p. 3-10, 2012.

SIVARAMAKRISHNAN, S.; PATELL, V. Z.; FLOWER, D. J.; PEACOCK, J. M. Proline accumulation and nitrate reductase activity in contrasting sorghum lines during mid-season drought stress. **Physiological Plant**, v. 74, n. 3, p. 418-426, 2006.

SMITH, R. H.; BHASKARAN, S.; MILLER, F. R. Screening for drought tolerance in sorghum using cell culture. **In Vitro Cellular and Developmental Biology**, v. 21, n. 10, p. 541-545, 1985.

SOUZA, A. A. de; CARVALHO, A. J. de; BASTOS, E. A.; PORTUGAL, A. F.; TORRES, L. G.; BATISTA, P. S. C.; JULIO, M. P. M.; JULIO, B. H. M.; MENEZES, C. B. de. Grain sorghum grown under drought stress at pre-and post-flowering in semiarid environment. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 4, p. 97-105, 2020.

SRAYEDDIN, I.; DOUSSAN, C. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. **Plant and Soil**, v. 319, p. 185-207, 2009.

SUBUDHI, P. K.; ROSENOW, D. T.; NGUYEN, H. T. Quantitative trait loci for the stay green trait in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench): consistency across genetic backgrounds and environments. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 101, p. 733-741, 2000.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TALEBI, R. Evaluation of chlorophyll content and canopy temperature as indicators for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum*). **Australian Journal Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 11, p. 1457-1462, 2011.

TANGPREMSRI, T.; FUKAI, S.; FISCHER, K. S. Growth and yield of sorghum lines extracted from a population for differences in osmotic adjustment. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 1, p. 61-74, 1995.

TAO, Y. Z.; HENZELL, R. G.; JORDAN, D. R.; BUTLER, D. G.; KELLY, A. M.; MCINTYRE, C. L. Identification of genomic regions associated with stay green in sorghum by testing RILs in multiple environments. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 100, p. 1225-1232, 2000.

TARI, I.; LASKAY, G.; TAKACS, Z.; POOR, P. Response of sorghum to abiotic stresses: a review. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 4, p. 1-11, 2013.

THOMAS, H.; HOWARTH, C. J. Five ways to stay green. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, p. 329-337, 2000.

TIETZ, A.; LUDEHIG, M.; DINGKUHN, M.; DORFFING, K. Effect of abscisic acid on the transport of assimilates in barley. **Planta**, v. 152, p. 557-561, 1981.

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

TSAGO, Y.; ANDARGIE, M.; TAKELE, A. In vitro screening for drought tolerance in different sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties. **Journal of Stress Physiology and Biochemistry**, v. 9, n. 3, p. 72-83, 2013.

TSAGO, Y.; ANDARGIE, M.; TAKELE, A. In vitro selection of sorghum (*Sorghum bicolor* (L) Moench) for polyethylene glycol (PEG) induced drought stress. **Plant Science Today**, v. 1, n. 2, p. 62-68, 2014.

TUINSTRAN, M. R.; GROTE, E.; GOLDSBROUGH, P. B.; EJETA, G. Identification of quantitative trait loci associated with pre-flowering drought tolerance in sorghum. **Crop Science**, v. 36, n. 5, p. 1337-1344, 1996.

TUINSTRAN, M. R.; EJETA, G.; GOLDSBROUGH, P. B. Evaluation of near-isogenic sorghum lines contrasting for QTL markers associated with drought tolerance. **Crop Science**, v. 38, n. 3, p. 835-842, 1998.

TUINSTRAN, M. R.; GROTE, E. M.; GOLDSBROUGH, P. B.; EJETA, G. Genetic analysis of post-flowering drought tolerance and components of grain development in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Molecular Breeding**, v. 3, p. 439-448, 1997.

VIDYABHUSHANAM, R. V.; VASUDEVA, RAO, M. J.; HOUSE, L. R. (Ed.). **Proceedings ICRISAT-AICSIP (ICAR) working group meeting on striga control**. Patancheru: ICRISAT, 1982. Disponível em: <http://oar.icrisat.org/2814/>. Acesso em: 13 fev. 2021.

VINODHANA, N. K.; GANESAMURTHY, K.; PUNITA, D. Genetic variability and drought tolerant studies in sorghum. **International Journal of Plant Sciences**, v. 4, n. 2, p. 460-463, 2009.

WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Free proline accumulation in drought-stressed plants under laboratory conditions. **Plant and Soil**, v. 40, p. 689-692, 1974.

WALULU, R. S.; ROSENOW, D. T.; WESTER, D. B.; NGUYEN, H. T. Inheritance of the stay green trait in sorghum. **Crop Science**, v. 34, n. 4, p. 970-972, 1994.

WASAYA, A.; ZHANG, X.; FANG, Q.; YAN, Z. Root phenotyping for drought tolerance: a review. **Agronomy**, v. 8, n. 11, article 241, 2018.

WOOD, A. J.; GOLDSBROUGH, P. B. Characterization and expression of dehydrins in water-stressed *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v. 99, n. 1, p. 144-152, 1997.

XU, W. M.; SUBUDHI, P. K.; CRASTA, O. R.; ROSENOW, D. T.; MULLET, J. E.; NGUYEN, H. T. Molecular mapping of QTLs conferring stay-green in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Genome**, v. 43, n. 3, p. 461-69, 2000.

YANG, W. J.; RICH, P. J.; AXTELL, J. D.; WOOD, K. V.; BONHAM, C. C.; EJETA, G.; MICKELBART, M. V.; RHODES, D. Genotypic variation for glycinebetaine in sorghum. **Crop Science**, v. 43, n. 1, p. 162-169, 2003.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M. B. Antioxidant responses to drought in sunflower and sorghum seedlings. **New Phytologist**, v. 132, n. 3, p. 361-373, 1996a.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M. B. Enzymatic responses of the ascorbate-glutathione cycle to drought in sorghum and sunflower plants. **Plant Science**, v. 113, n. 2, p. 139-147, 1996b.

Literatura Recomendada

ARMENGAUD, P.; ZAMBAUX, K.; HILLS, A.; SULPICE, R.; PATTISON, R. J.; BLATT, M. R.; AMTMANN, A. EZ-Rhizo: integrated software for the fast and accurate measurement of root system architecture. **Plant Journal**, v. 57, n. 5, p. 945-956, 2009.

ARSENAULT, J.; POULERU, S.; MESSIER, C.; GUAY, R. WinRHIZO, a root-measuring system with a unique overlap correction method. **HortScience**, v. 30, n. 4, p. 906, 1995.

BELETE, T. Breeding for resistance to drought: a case in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal of Agriculture and Forest Meteorology Research**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2018.

BORRELL, A.; JORDAN, D.; MULLET, J.; HENZELL, B.; HAMMER, G. Drought adaptation in sorghum. In: RIBAUT, J. M. (ed.). **Drought adaptation in cereals**. Binghamton: Haworth Press, 2006. p. 335-378.

INGRAM, K. T.; LEERS, G. A. Software for measuring root characters from digital images. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 4, p. 918-922, 2001.

KUIJKEN, R. C. P.; EEUWIJK, F. A. van; MARCELIS, L. F. M.; BOUWMEESTER, H. J. Root phenotyping: from component trait in the lab to breeding. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 18, p. 5389-5401, 2015.

LE BOT, J.; SERRA, V.; FABRE, J.; DRAYE, X.; ADAMOWICZ, S.; PAGÈS, L. DART: a software to analyze root system architecture and development from captured images. **Plant and Soil**, v. 326, p. 261-273, 2010.

LOBET, G.; PAGÈS, L.; DRAYE, X. A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. **Plant Physiology**, v. 157, n. 1, p. 29-39, 2011.

LOBET, G.; POUND, M. P.; DIENER, J.; PRADAL, C.; DRAYE, X.; GODIN, C.; JAVAUX, M.; LEITNER, D.; MEUNIER, F.; NACRY, P.; PRIDMORE, T. P.; SCHNEPF, A. Root system markup language: toward a unified root architecture description language. **Plant Physiology**, v. 167, n. 3, p. 617-627, 2015.

NAEEM, A.; FRENCH, A. P.; WELLS, D. M.; PRIDMORE, T. P. High-throughput feature counting and measurement of roots. **Bioinformatics**, v. 27, n. 9, p. 1337-1338, 2011.

OUEDRAOGO, N. **Genetic improvement of local sorghum (*Sorghum bicolor* L. moench) varieties for drought tolerance**. 2015. 149 f. Tese (Doutorado) - University of Ghana, Accra, 2015.

PATRICK, O. O.; JEFFREY, J. V.; EJETA, G. Selection for drought tolerance in sorghum using desiccants to simulate post-anthesis drought stress. **Field Crops Research**, v. 198, p. 312-321, 2016.

PRICE, A. H.; SHRESTHA, R.; PIFANELLI, P.; LUPOTT, E.; CASELA, L. Soil-filled glass rhizotrons for visualizing roots. In: SHASHIDHAR, H. E.; HENRY, A.; HARDY, B. (ed.). **Methodologies for root drought studies in rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 2012. p. 9-14.

PRICE, A. H.; STEELE, K. A.; GORHAM, J.; BRIDGES, J. M.; MOORE, B. J.; EVANS, J. L.; RICHARDSON, P.; JONES, R. G. W. Upland rice grown in soil-filled chambers and exposed to contrasting water-deficit regimes: I. Root distribution, water use and plant water status. **Field Crops Research**, v. 76, n. 1, p. 11-24, 2002.

REDDY, P. S. Breeding for abiotic stress resistance in sorghum. In: ARUNA, C.; VISARADA, K. B. R. S.; BHAT, B. V.; TONAPI, V. A. (ed.). **Breeding sorghum for diverse end uses**. Amsterdam: Elsevier, 2019. p. 325-340.

ROSTAMZA, M.; RICHARDS, R. A.; WATT, M. Response of millet and sorghum to a varying water supply around the primary and nodal roots. **Annals of Botany**, v. 112, n. 2, p. 439-446, 2013.

SHASHIDHAR, H. E.; GOWDA, H. S. V.; RAVEENDRA, G. M.; KUNDUR, P. J.; KUMAR, G. N.; SUPRABHA, N.; UPADHYA, P.; SONAM, R. PVC tubes to characterize roots and shoots to complement field plant productivity studies. In: SHASHIDHAR, H. E.; HENRY, A.; HARDY, B. (Ed.). **Methodologies for root drought studies in rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 2012. p. 15-21.

Capítulo 13

Recursos genético-moleculares para auxiliar o melhoramento do sorgo

*Claudia Teixeira Guimarães
Jurandir Vieira de Magalhães*

Introdução

O sorgo, além da grande importância agronômica entre as gramíneas, destaca-se pelo seu genoma relativamente pequeno, constituído de aproximadamente 730 mega-pares-de-bases (Mpb), em comparação com o genoma do milho (2.500 Mpb) (Paterson et al., 2009). Adicionalmente, há colinearidade entre os genomas de gramíneas como o sorgo, o arroz, o milho e a cana-de-açúcar, o que possibilita estudos comparativos entre essas espécies. Os marcadores moleculares surgiram na década de 1980, e foram utilizados em sorgo a partir da década de 1990, com a disponibilidade de marcadores, de mapas genéticos e de estratégias para mapeamento de regiões genômicas que controlam características quantitativas (QTLs, *Quantitative Trait Loci*, Loci de Características Quantitativas). A disponibilização da sequência completa do genoma do sorgo em 2009 (Paterson et al., 2009) ampliou as possibilidades para a identificação de genes de interesse agronômico e para aplicações no melhoramento genético. Assim, o presente capítulo apresenta um histórico dos marcadores moleculares em sorgo, destacando-se a construção dos principais mapas genéticos, e a identificação de genes e QTLs utilizando mapeamento biparental e associativo. Serão apresentadas também algumas estratégias de seleção assistida e as suas aplicações em programas de melhoramento de sorgo.

Marcadores Moleculares e Mapas Genéticos

O primeiro marcador de DNA em plantas foi o RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphisms*, Polimorfismo no Comprimento de Fragmentos de Restrição), ou seja, um marcador baseado na diferença do tamanho dos fragmentos de DNA gerados pela clivagem do DNA genômico

com enzimas de restrição (Botstein et al., 1980). Os polimorfismos são revelados pela hibridização do DNA genômico com fragmentos de DNA de cópia única, denominados de sondas, que são marcados com radioatividade ou quimioluminescência. O processo de hibridização permite o uso de sondas derivadas de espécies filogeneticamente próximas, possibilitando o mapeamento comparativo. Os primeiros grupos de ligação de sorgo foram obtidos com marcadores RFLPs derivados de sondas de milho (Whitkus et al., 1992), que foram posteriormente complementados com 146 sondas de sorgo e 55 de milho, gerando 10 grupos de ligação, representando os cromossomos de sorgo (Pereira et al., 1994). Outros dois mapas genéticos de sorgo contendo 190 e 276 marcadores RFLP foram publicados em 1994 (Xu et al., 1994; Chittenden et al., 1994).

A facilidade, a rapidez e a versatilidade da técnica de PCR (*Polymerase Chain Reaction*, Reação em Cadeia da Polimerase) possibilitaram o surgimento de uma nova geração de marcadores moleculares baseados em *primers* ou oligonucleotídeos mais curtos, isto é, com menor número de pares de base (pb) e com sequência arbitrária, sem a necessidade do conhecimento da sequência-alvo, que foram denominados RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*, Polimorfismo de DNA Amplificado ao Acaso) (Williams et al., 1990) ou AP-PCR (*Arbitrarily Primed-PCR*, Polimorfismo Arbitrário Amplificado por PCR) (Welsh; McClelland, 1990). Os polimorfismos RAPD são revelados quando existe uma substituição de bases (SNPs, *Single Nucleotide Polymorphisms*, Polimorfismo de Nucleotídeo Único) ou pequenas inserções/deleções (Indels), no sítio de pareamento do primer, gerando presença ou ausência de fragmentos amplificados. Assim, os RAPDs são marcadores dominantes e, em função da sua simplicidade técnica, esse tipo de marcador foi amplamente utilizado em análises genéticas de plantas, incluindo o sorgo. No entanto, a técnica apresenta ocasionalmente baixa repetibilidade, tendo sido substituída por técnicas mais robustas, o que foi possível graças ao avanço no conhecimento sobre as sequências genômicas.

Os microssatélites ou SSR (*Simple Sequence Repeats*), Sequências Simples Repetidas, são sequências repetidas em tandem, de 1 a 4 nucleotídeos, distribuídas em genomas de eucariotos, incluindo as plantas (Litt; Luty, 1989). Os pares de primers SSR são complementares às regiões conservadas que flanqueiam os microssatélites, e os polimorfismos são obtidos em função da diferença no número dos elementos simples repetidos. Os microssatélites são marcadores codominantes, permitindo identificar

homozigotos e heterozigotos, e multialélicos, possuindo um elevado conteúdo de informação genética por loco. Como a metodologia é baseada em PCR, o marcador SSR é tecnicamente simples, mas requer o desenho de pares de primers específicos para as regiões flanqueando os microssatélites.

O AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphisms*, Polimorfismo de Comprimento de Fragmento Amplificado) é um tipo de marcador que alia a especificidade dos sítios de restrição com a praticidade da técnica do PCR, sendo muito utilizado no mapeamento genético (Vos et al., 1995). A técnica baseia-se na clivagem simultânea do DNA genômico com duas enzimas de restrição e ligação de adaptadores específicos, com um dos terminais com sequência complementar às extremidades coesivas dos sítios de restrição e outro aos sítios de ligação dos primers, que serão utilizados nas etapas de PCR. Assim, a combinação de enzimas de restrições com sequências aleatórias de primers oferece uma infinidade de possibilidades para a geração de polimorfismos em diversas espécies.

Em sorgo, todos esses marcadores baseados em PCR foram utilizados para gerar mapas genéticos saturados (Hausmann et al., 2002; Menz et al., 2002; Bowers et al., 2003; Feltus et al., 2006), que são valiosas ferramentas para a busca por genes de interesse. Mace et al. (2009) construíram um mapa de ligação consenso utilizando marcadores DArTs (*Diversity Arrays Technology*), enquanto um dos mapas mais saturados de sorgo é composto por 2.246 fragmentos amplificados loco-específicos em todos os 10 cromossomos (Ji et al., 2017).

Outras Ferramentas Biotecnológicas

Mapas Físicos

A distância genética não está diretamente associada com a distância física, sendo altamente variável entre espécies e ao longo do cromossomo. Mapas físicos são obtidos por meio do alinhamento de grandes fragmentos cromossômicos, que variam de 150 a 300 Kb, e são mantidos em bibliotecas de cromossomos artificiais de bactérias (BAC, *Bacterial Artificial Chromosome*), de fagos (*PI Artificial Chromosome*) e leveduras (YAC, *Yeast Artificial Chromosome*). As bibliotecas de BACs são genotipadas com marcadores moleculares para viabilizar o alinhamento dos contigs e integração aos mapas genéticos. Mapas físicos de sorgo estão disponíveis (Klein et al., 2000; Bowers et al., 2005) e são ferramentas potentes na

clonagem de genes baseada em mapa, como foi o caso da clonagem do gene que confere tolerância ao alumínio em sorgo, o *SbMATE* (Magalhães et al., 2007).

Estudos de Expressão Gênica em Escala Genômica

Estudos de expressão gênica foram iniciados com bancos de etiquetas de sequências expressas (ESTs, *Expressed Sequenced Tags*). Um exemplo foi a obtenção de mais de 16.000 ESTs de sorgo submetidos a estresses por seca e por patógenos (Pratt et al., 2005). Bancos de dados públicos reúnem informações sobre ESTs de várias espécies como o NCBI (www.ncbi.nlm.nih.gov), bem como outras plataformas que agregam informações sobre genes expressos como o Gene Expression Omnibus (www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/info/overview.html).

Os microarranjos de cDNA (DNA complementar) foram as primeiras tecnologias para a análise global de expressão de genes, onde oligonucleotídeos representando genes únicos eram impressos em lâminas de vidro e hibridizados com amostras de RNA tratados sob diferentes condições e marcados com fluorescências distintas. Microarranjos contendo em torno de 13.000 genes únicos foram utilizados para avaliar o padrão de expressão gênica de sorgo quanto às respostas aos estresses salino, osmótico e de ácido abscísico (Buchanan et al., 2005). O primeiro chip de genes comercial para o sorgo foi delineado pela Affymetrix, contendo mais de 1 milhão de sondas representando éxons, genes nucleares, cloroplastídicos e mitocondriais, além de pequenos RNAs, microRNAs e RNAs não codificadores (GeneChip® SorghWta520972F, www.ncbi.nlm.nih.gov/geo/query/acc.cgi?acc=GPL17576). Shakoore et al. (2014) utilizaram esse chip para avaliar o perfil de expressão gênica em quatro tecidos vegetativos de seis genótipos diversos de sorgo granífero, sacarino e para bioenergia. A empresa Agilent Technologies UK Ltd. desenvolveu o chip incluindo 28.585 sondas, que são fragmentos de 60 nucleotídeos, em um formato de eArray 4X44K (earray.chem.agilent.com/earray/). Esse chip de genes foi utilizado para investigar a resposta transcricional de sorgo submetido a estresses de calor e de seca impostos individualmente e em combinação (Johnson et al., 2014). Outro chip, também desenvolvido pela Agilent e representando 35.577 regiões codificadoras anotadas no genoma do sorgo, foi utilizado para avaliar a expressão diferencial de genes entre as linhagens de sorgo granífero BTx623 e sacarino Keller (Jiang et al., 2013).

Com a redução significativa dos custos do sequenciamento em larga escala, os estudos de expressão gênica em escala genômica foram viabilizados pelo sequenciamento direto do RNA (RNA-seq), permitindo quantificar as moléculas de RNA presentes em um determinado tecido, sob uma determinada condição. Plataformas de bioinformática e programas específicos processam esses dados e geram informações sobre genes diferencialmente expressos, além de ser uma ferramenta para identificar polimorfismos nesses genes entre genótipos contrastantes. A técnica de RNA-seq foi utilizada para elucidar a base molecular da resposta de genótipos de sorgo contrastantes quanto à tolerância ao frio, permitindo identificar genes diferencialmente expressos sob diferentes temperaturas e polimorfismos do tipo SNP entre esses genótipos (Chopra et al., 2015). Análises transcriptômicas têm sido realizadas por meio de RNA-seq em vários genótipos de sorgo e sob diferentes condições.

Populações Segregantes e Painéis de Diversidade

As populações segregantes utilizadas para o mapeamento de QTLs em sorgo são, em geral, biparentais, isto é, derivadas do cruzamento entre duas linhagens, preferencialmente contrastantes para a característica de interesse. As populações de mapeamento mais comumente empregadas são compostas por progênies F_2 , linhagens endogâmicas recombinantes (RILs, *Recombinant Inbreed Lines*) ou de retrocruzamentos. Algumas populações de mapeamento de sorgo foram construídas a partir de cruzamentos entre diferentes espécies de sorgo para aumentar a detecção de locos polimórficos, como *Sorghum bicolor* x *S. propinquum* (Kong et al., 2013).

Várias populações de mapeamento de sorgo foram utilizadas para a confecção de mapas genéticos e para o mapeamento de características quantitativas e qualitativas. Por exemplo, um mapa genético contendo aproximadamente 3.000 marcadores AFLPs, RFLPs e SSRs foi construído por Menz et al. (2002) utilizando uma população de linhagens endogâmicas recombinantes (RILs) derivadas do cruzamento entre as linhagens BTx623 x IS3620C. Utilizando marcadores AFLP, Klein et al. (2000) integraram os mapas físicos e genéticos de sorgo, localizando *contigs* de BACs no mapa genético. Antecedendo o sequenciamento completo do genoma do sorgo (Paterson et al., 2009), esse recurso foi utilizado para o mapeamento genético do loco Alt_{SB} , que controla a tolerância ao alumínio tóxico em sorgo (Magalhães et al., 2004), e para a posterior clonagem do gene subjacente, *SbMATE* (Magalhães et al., 2007). Mace et al. (2009) construíram um mapa

consenso de referência de sorgo contendo marcadores DArTs, AFLPs e SSRs, a partir de seis mapas individuais, permitindo a integração com outros recursos genômicos.

Vários recursos genéticos úteis para as mais diversas aplicações foram gerados pela comunidade interessada na cultura do sorgo. Boyles et al. (2019) resumiram recursos genéticos e genômicos, incluindo painéis associativos altamente diversos adequados para estratégias de mapeamento associativo, populações para mapeamento associativo aninhado (NAM, *Nested Association Mapping*, Yu et al., 2008), painéis gerados por retrocruzamento (*backcrossed*-NAM, BC-NAM), populações biparentais, e populações mutagenizadas (TILLING populations). Populações multiparentais menos convencionais como *Multi-Parent Advanced Generation Intercross* (MAGIC) (Ongon; Ejeta, 2018), bem como populações de recombinação ao acaso parcialmente endogâmicas (Bernardino et al., 2020), foram também geradas e são úteis para a identificação de QTLs e de genes relacionados com várias características importantes para a cultura do sorgo.

Métodos de Mapeamento de QTLs

O termo *Quantitative Trait Loci* (QTLs) é utilizado para denominar locos que controlam características quantitativas, que apresentam um padrão contínuo de variação fenotípica. Os métodos estatísticos disponíveis para o mapeamento de QTLs fornecem informações sobre a arquitetura genética de uma característica, como o número de locos subjacentes, suas localizações cromossômicas e o modo de ação gênica (aditividade, dominância e epistasia). Outros modelos, ainda mais complexos, podem ser definidos para fins específicos, como o estudo simultâneo de múltiplas características em múltiplos ambientes.

Os métodos de mapeamento de QTLs podem ser apresentados seguindo uma ordem cronológica: mapeamento por intervalo simples, por intervalo composto e por múltiplos intervalos. No método de mapeamento por intervalo simples (Lander; Botstein, 1989), cada posição no genoma, definida por um marcador, é testada individualmente por um modelo de regressão simples. No mapeamento por intervalo composto (Zeng, 1994), são incluídos cofatores no modelo de regressão múltipla. Nesse caso, os cofatores são marcadores com efeitos significativos na característica de interesse e selecionados por meio de métodos estatísticos de regressão linear. No mapeamento por múltiplos intervalos (Kao et al., 1999), a busca

por múltiplos QTLs também é realizada a partir de um modelo de regressão múltipla com cofatores em cada posição no genoma a ser testada, porém, nesse método, os cofatores são QTLs mapeados em etapas anteriores do procedimento de busca por QTLs.

Um compêndio de QTLs identificados em sorgo desde 1995, incluindo também arroz e milho, foi publicado por Mace et al. (2019) com o intuito de facilitar a identificação de genes candidatos conservados entre as três espécies de gramíneas dentro da perspectiva de genômica comparativa (aussorgm.org.au/sorghum-qlt-atlas/). Por sua vez, a localização de genes de efeito maior em sorgo obtida ao longo de vários anos por diferentes grupos de pesquisa foi integrada ao mapa genético de sorgo por Mace e Jordan (2010). Dois importantes recursos para o melhoramento de sorgo em um contexto genômico é a base de dados de SNPs, SorgGSD (sorgsd.big.ac.cn/), bem como a sequência completa do genoma do sorgo (phytozome.jgi.doe.gov/pz/portal.html#!info?alias=Org_Sbicolor), também disponível na base de dados PlantGDB (www.plantgdb.org/SbGDB/cgi-bin/search.pl). Várias ferramentas úteis incluindo recursos para análises filogenéticas e de similaridade entre sequências, além de mapas comparativos, podem ser acessadas em www.gramene.org.

Melhoramento Assistido por Marcadores

A identificação de regiões genômicas associadas a diferentes características de interesse é um passo importante para o melhoramento assistido visando ao desenvolvimento de cultivares superiores. Marcadores moleculares flanqueando a região do QTL podem ser utilizados para a introgressão dos alelos favoráveis em genótipos-elites, via sucessivos retrocruzamentos assistidos por marcadores. No entanto, esses marcadores estão limitados à existência de polimorfismos entre o genótipo doador e os parentais recorrentes. Por outro lado, a identificação dos genes controlando tais características possibilitará o desenvolvimento de marcadores funcionais, associados aos polimorfismos presentes dentro dos genes e relacionados aos alelos de interesse. Porém, antes da aplicação direta na seleção de materiais superiores, esses marcadores funcionais devem ser validados em diferentes *backgrounds* genéticos. Vale ressaltar que os avanços nas técnicas de sequenciamento e de genotipagem irão contribuir cada vez mais para a identificação de genes e de marcadores funcionais com grande potencial de utilização na seleção assistida.

Apesar dos relatos de sucesso na aplicação da seleção assistida por marcadores moleculares (MAS, *Marker-Assisted Selection*) para características monogênicas ou controladas por poucos genes ou QTLs de grande efeito, poucos exemplos estão disponíveis para características de herança quantitativa. Em geral, essas características são controladas por vários genes ou QTLs de efeitos pequenos, o que reduz a eficiência da estratégia de retrocruzamento assistido por marcadores (MABC, *Marker-Assisted Backcrosses*), uma vez que a piramidação de alelos favoráveis para um grande número de QTLs requer populações de retrocruzamento com um elevado número de indivíduos (Xu et al., 2012). No entanto, a redução dos custos para a obtenção de grande densidade de marcadores moleculares distribuídos ao longo do genoma, associada ao desenvolvimento de métodos estatísticos e recursos computacionais para o processamento de grande volume de dados, tem estimulado a aplicação da seleção genômica ampla (GWAS, *Genome Wide Selection*) (Meuwissen et al., 2001) em programas de melhoramento assistido para características quantitativas.

A partir de um modelo genético-estatístico que incorpora simultaneamente as informações de um grande número de marcadores moleculares, a seleção genômica permite determinar os valores genéticos (*Breeding Values*) dos indivíduos candidatos à seleção, levando em conta dados fenotípicos e genotípicos disponíveis para uma população de treinamento (Lorenz, 2013). Por utilizar um maior número de marcadores distribuídos ao longo do genoma, esta abordagem permite considerar, simultaneamente, os efeitos de um grande número de genes, ou regiões cromossômicas, garantindo que grande parte da variância genética seja contabilizada e utilizada para aumentar a acurácia na predição dos valores genéticos de indivíduos presentes nas populações de seleção.

Referências

BERNARDINO, K. C.; MENEZES, C. B.; SOUSA, S. M.; GUIMARÃES, C. T.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; HUFNAGEL, B.; PASTINA, M. M.; MAGALHÃES, J. V. Association mapping and genomic selection for sorghum adaptation to tropical soils of Brazil in a sorghum multiparental random mating population. **Theoretical and Applied Genetics**, 2020.

BOTSTEIN, D.; WHITE, R. L.; SKOLNICK, M.; DAVIS, R. W.

Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms. **American Journal of Human Genetics**, v. 32, p. 314-331, 1980.

BOWERS, J. E.; ABBEY, C.; ANDERSON, S.; CHANG, C.; DRAYE, X.; HOPPE, A. H.; JESSUP, R.; LEMKE, C.; LENNINGTON, J.; LI, Z.; LIN, Y.-R.; LIU, S.-C.; LUO, L.; MARLER, B. S.; MING, R.; MITCHELL, S. E.; QUIANG, D.; REISCHMANN, K.; SCHULZE, S. R.; SKINNER, D. N.; WANG, Y.-W.; KRESOVICH, S.; SCHERTZ, K. F.; PATERSON, A. H. A high-density genetic recombination map of sequence-tagged sites for sorghum, as a framework for comparative structural and evolutionary genomics of tropical grains and grasses. **Genetics**, v. 165, p. 367-386, 2003.

BOWERS, J. E.; ARIAS, M. A.; ASHER, R.; AVISE, J. A.; BALL, R. T.; BREWER, G. A.; BUSS, R. W.; CHEN, A. H.; EDWARDS, T. M.; ESTILL, J. C.; EXUM, H. E.; GOFF, V. H.; HERRICK, K. L.; STEELE, C. L. J.; KARUNAKARAN, S.; LAFAYETTE, G. K.; LEMKE, C.; MARLER, B. S.; MASTERS, S. L.; MCMILAN, J. M.; NELSON, L. K.; NEWSOME, G. A.; NWAKANMA, C. C.; ODEH, R. N.; PHELPS, C. A.; RARICK, E. A.; ROGERS, C. J.; RYAN, S. P.; SLAUGHTER, K. A.; SODERLUND, C. A.; TANG, H.; WING, R. A.; PATERSON, A. H. Comparative physical mapping links conservation of microsynteny to chromosome structure and recombination in grasses. **Proceedings of the National Academy of Science United States of America**, v. 102, n. 37, p. 13206-13211, 2005.

BOYLES, R. E.; BRENTON, Z. W.; KRESOVICH, S. Genetic and genomic resources of sorghum to connect genotype with phenotype in contrasting environments. **The Plant Journal**, v. 97, n. 1, p. 19-39, 2019.

BUCHANAN, C. D.; LIM, S.; SALZMAN, R. A.; KAGIAMPAKIS, I.; MORISHIGE, D. T.; WEERS, B. D.; KLEIN, R. R.; PRATT, L. H.; CORDONNIER-PRATT, M. M.; KLEIN, P. E.; MULLET, J. E. *Sorghum bicolor*'s transcriptome response to dehydration, high salinity and ABA. **Plant Molecular Biology**, v. 58, n. 5, p. 699-720, 2005.

CHITTENDEN, L. M.; SCHERTZ, K. F.; LIN, Y. R.; WING, R. A.; PATERSON, A. H. A detailed RFLP map of *Sorghum bicolor* x *S. propinquum*, suitable for high-density mapping, suggests ancestral duplication of Sorghum chromosomes or chromosomal segments. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 87, n. 8, p. 925-933, 1994.

CHOPRA, R.; BUROW, G.; HAYES, C.; EMENDACK, Y.; XIN, Z.; BURKE, J. Transcriptome profiling and validation of gene based single nucleotide polymorphisms (SNPs) in sorghum genotypes with contrasting responses to cold stress. **BMC Genomics**, v. 16, n. 1040, 2015.

FELTUS, F. A.; HART, G. E.; SCHERTZ, K. F.; CASA, A. M.; KRESOVICH, S.; ABRAHAM, S.; KLEIN, P. E.; BROWN, P. J.; PATERSON, A. H. Alignment of genetic maps and QTLs between inter- and intra-specific sorghum populations. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 112, n. 7, p. 1295-1305, 2006.

HAUSSMANN, B.; HESS, D.; SEETHARAMA, N.; WELZ, H.; GEIGER, H. Construction of a combined sorghum linkage map from two recombinant inbred populations using AFLP, SSR, RFLP, and RAPD markers, and comparison with other sorghum maps. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 105, p. 629-637, 2002.

JI, G.; ZHANG, Q.; DU, R.; LV, P.; MA, X.; FAN, S.; LI, S.; HOU, S.; HAN, Y.; LIU, G. Construction of a high-density genetic map using specific-locus amplified fragments in sorghum. **BMC Genomics**, v. 18, article 51, 2017.

JIANG, S. Y.; MA, Z.; VANITHA, J.; RAMACHANDRAN, S. Genetic variation and expression diversity between grain and sweet sorghum lines. **BMC Genomics**, v. 14, article 18, 2013.

JOHNSON, S. M.; LIM, F.-L.; FINKLER, A.; FROMM, H.; SLABAS, A. R.; KNIGHT, M. R. Transcriptomic analysis of *Sorghum bicolor* responding to combined heat and drought stress. **BMC Genomics**, v. 15, article 456, 2014.

KAO, C.-H.; ZENG, Z.-B.; TEASDALE, R. D. Multiple interval mapping for quantitative trait loci. **Genetics**, v. 152, n. 3, p. 1203-1216, 1999.

KLEIN, P. E.; KLEIN, R. R.; CARTINHOOR, S. W.; ULANCH, P. E.; DONG, J.; OBERT, J. A.; MORISHIGE, D. T.; SCHLUETER, S. D.; CHILDS, K. L.; ALE, M.; MULLET, J. E. A high-throughput AFLP-based method for constructing integrated genetic and physical maps: progress toward a sorghum genome map. **Genome Research**, v. 10, n. 6, p. 789-807, 2000.

KONG, W.; JIN, H.; FRANKS, C. D.; KIM, C.; BANDOPADHYAY, R.; RANA, M. K.; AUCKLAND, S. A.; GOFF, V. H.; RAINVILLE, L. K.; BUROW, G. B.; WOODFIN, C.; BURKE, J. J.; PATERSON, A. H. Genetic analysis of recombinant inbred lines for *Sorghum bicolor* x *Sorghum propinquum*. **G3 - Genes, Genomes, Genetics**, v. 3, n. 1, p. 101-108, 2013.

LANDER, E. S.; BOTSTEIN, D. Mapping mendelian factors underlying quantitative traits using RFLP linkage maps. **Genetics**, v. 121, n. 1, p. 185-199, 1989.

LITT, M.; LUTY, J. A. A hypervariable microsatellite revealed by in vitro amplification of a dinucleotide repeat within the cardiac muscle actin gene. **American Journal of Human Genetics**, v. 44, n. 3, p. 398-401, 1989.

LORENZ, A. J. Resource allocation for maximizing prediction accuracy and genetic gain of genomic selection in plant breeding: a simulation experiment. **G3 - Genes, Genomes, Genetics**, v. 3, n. 3, p. 481-491, 2013.

MACE, E. S.; RAMI, J. F.; BOUCHET, S.; KLEIN, P. E.; KLEIN, R. R.; KILIAN, A.; WENZL, P.; XIA, L.; HALLORAN, K.; JORDAN, D. R. A consensus genetic map of sorghum that integrates multiple component maps and high-throughput Diversity Array Technology (DArT) markers. **BMC Plant Biology**, v. 9, article 13, 2009.

MACE, E. S.; JORDAN, D. R. Location of major effect genes in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 121, n. 7, p. 1339-1356, 2010.

MACE, E. S.; INNES, D.; HUNT, C.; WANG, X.; TAO, Y.; BAXTER, J.; HASSALL, M.; HATHORN A.; JORDAN, D. R. The Sorghum QTL Atlas: a powerful tool for trait dissection, comparative genomics and crop improvement. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 132, p. 751-766, 2019.

MAGALHÃES, J. V.; GARVIN, D. F.; WANG, Y.; SORRELLS, M. E.; KLEIN, P. E.; SCHAFFERT, R. E.; LI, L.; KOCHIAN, L. V. Comparative mapping of a major aluminum tolerance gene in sorghum and other species in the Poaceae. **Genetics**, v. 167, n. 4, p. 1905-1914, 2004.

MAGALHÃES, J. V.; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.-H.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A.; SHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.; TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, v. 39, p. 1156-1161, 2007.

MENZ, M. A.; KLEIN, R. R.; MULLET, J. E.; OBERT, J. A.; UNRUH, N. C.; KLEIN, P. E. A high-density genetic map of *Sorghum bicolor* (L.) Moench based on 2926 AFLP, RFLP and SSR markers. **Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 483-499, 2002.

MEUWISSEN, T. H. E.; HAYES, B. J.; GODDARD, M. E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. **Genetics**, v. 157, n. 4, p. 1819-1829, 2001.

ONGON, P. O.; EJETA, G. Mating design and genetic structure of a multi-parent advanced generation intercross (MAGIC) population of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 8, n. 1, p. 331-341, 2018.

PATERSON, A. H.; BOWERS, J. E.; BRUGGMANN, R. M.; DUBCHAK, I.; GRIMWOOD, J.; GUNDLACH, H.; HABERER, G.; HELLSTEN, U.; MITROS, T.; POLIAKOV, A.; SCHMUTZ, J.; SPANNAGL, M.; TANG, H.; WANG, X.; WICKER, T.; BHARTI, A. K.; CHAPMAN, J.; FELTUS, F. A.; GOWIK, U.; GRIGORIEV, I. V.; LYONS, E.; MAHER, C. A.; MARTIS, M.; NARECHANIA, A.; OTILLAR, R. P.; PENNING, B. W.; SALAMOV, A. A.; WANG, Y.; ZHANG, L.; CARPITA, N. C.;

FREELING, M.; GINGLE, A. R.; HASH, C. T.; KELLER, B.; KLEIN, P.; KRESOVICH, S.; McCANN, M. C.; MING, R.; PETERSON, D. G.; RAHMAN, M.-U.; WARE, D.; WESTHOFF, P.; MAYER, K. F. X.; MESSING, J.; ROKHSAR, D. The *Sorghum bicolor* genome and the diversification of grasses. **Nature**, v. 457, p. 551-556, 2009.

PEREIRA, M. G.; LEE, M.; BRAMEL-COX, P.; WOODMAN, W.; DOEBLEY, J.; WHITKUS, R. Construction of an RFLP map in sorghum and comparative mapping in maize. **Genome**, v. 37, n. 2, p. 236-243, 1994.

PRATT, L. H.; LIANG, C.; SHAH, M.; SUN, F.; WANG, H.; REID, S. P.; GINGLE, A. R.; PATERSON, A. H.; WING, R.; DEAN, R.; KLEIN, R.; NGUYEN, H. T.; MA, H.-M.; ZHAO, X.; MORISHIGE, D. T.; MULLET, J. E.; CORDONNIER-PRATT, M. M. Sorghum expressed sequence tags identify signature genes for drought, pathogenesis, and skotomorphogenesis from a milestone set of 16,801 unique transcripts. **Plant Physiology**, v. 139, n. 2, p. 869-884, 2005.

SHAKOOR, N.; NAIR, R.; CRASTA, O.; MORRIS, G.; FELTUS, A.; KRESOVICH, S. A *Sorghum bicolor* expression atlas reveals dynamic genotype-specific expression profiles for vegetative tissues of grain, sweet and bioenergy sorghums. **BMC Plant Biology**, v. 14, article 35, 2014.

VOS, P.; HOGERS, R.; BLEEKER, M.; REIJANS, M.; LEE, T.; HORNES, M.; FRIJTERS, A.; POT, J.; PELEMAN, J.; KUIPER, M.; ZABEAU, M. AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. **Nucleic Acids Research**, v. 23, n. 21, p. 4407-4414, 1995.

WELSH, J.; McCLELLAND, M. Fingerprinting genomes using PCR with arbitrary primers. **Nucleic Acids Research**, v. 18, n. 24, p. 7213-7218, 1990.

WHITKUS, R.; DOEBLEY, J.; LEE, M. Comparative genome mapping of sorghum and maize. **Genetics**, v. 132, n. 4, p. 1119-1130, 1992.

WILLIAMS, J. G. K.; KUBELICK, A. R.; LIVAK, K. J.; RAFALSKI, J. A.; TINGEY, S. V. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers. **Nucleic Acids Research**, v. 18, n. 22, p. 6531-6535, 1990.

XU, G.-W.; MAGILL, C. W.; SCHERTZ, K. F.; HART, G. E. A RFLP linkage map of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 89, p. 139-145, 1994.

XU, Y.; LU, Y.; XIE, C.; GAO, S.; WAN, J.; PRASANNA, B. M. Whole-genome strategies for marker-assisted plant breeding. **Molecular Breeding**, v. 29, p. 833-854, 2012.

YU, J.; HOLLAND, J. B.; MCMULLEN, M. D.; BUCKLER, E. S. Genetic design and statistical power of nested association mapping in maize. **Genetics**, v. 178, n. 1, p. 539-551, 2008.

ZENG, Z.-B. Precision mapping of quantitative trait loci. **Genetics**, v. 136, n. 4, p. 1457-1468, 1994.

Capítulo 14

Resistência de sorgo a insetos-praga

Camila da Silva Fernandes Souza

Simone Martins Mendes

Bruno Henrique Sardinha de Souza

José Magid Waquil

Ivenio Rubens de Oliveira

Paulo Afonso Viana

Introdução

Na natureza, as interações insetos-plantas são associações evolutivas envolvendo mecanismos de sobrevivência, selecionando genes de resistência da planta e a quebra dessa resistência pelos insetos num processo contínuo conhecido por coevolução. Essas complexas interações, como as de origem químicas, resultam no desenvolvimento de diferentes mecanismos de defesa nas plantas, que conseqüentemente fazem pressão de seleção sobre os insetos. Estes, por sua vez, desenvolvem mecanismos de desintoxicação das defesas químicas, proporcionando nova pressão de seleção sobre as plantas, que contra-atacam com a produção de outros compostos químicos (Ehrlich; Raven, 1964). Dessa forma, estudar os padrões comportamentais e biológicos de insetos-praga em suas plantas hospedeiras torna-se necessário para o entendimento da preferência e do desenvolvimento do inseto, bem como da resposta da planta diante das injúrias (Knolhoff; Heckel, 2013), e, assim, proporcionar conhecimentos para aplicação estratégica no Manejo Integrado de Pragas (MIP). Além disso, a resistência pode ser direcionada para selecionar resistência simpátrica ou alopátrica. A resistência simpátrica evolui em plantas na presença de insetos-praga, e a resistência alopátrica ocorre em plantas sem nenhum contato evolutivo prévio com o inseto-praga, ou seja, as espécies envolvidas evoluíram em sítios diferentes; a espécie-praga não se adaptou ao genótipo resistente (Harris, 1975).

A resistência de plantas a insetos, em função de sua natureza poligênica na maioria dos casos, pode se manifestar em diferentes níveis: alta resistência, moderada resistência, suscetibilidade e alta suscetibilidade

(Lara, 1991). A resistência de plantas, seja de forma natural ou transgênica, é uma das táticas preconizadas dentro do MIP (Manejo Integrado de Pragas), uma vez que apresenta como uma das principais vantagens, a associação compatível com os demais métodos de manejo. Como já é conhecido, as plantas possuem naturalmente diferenças quanto à suscetibilidade a pragas, isto é, um fenótipo pode apresentar maior ou menor resistência ou suscetibilidade ao ataque de insetos-praga, que pode ser expressa de forma constitutiva ou induzida (Gatehouse, 2002; Bastos et al., 2015).

As categorias de resistência de plantas a insetos, de acordo com as terminologias clássicas propostas por Painter (1951) e sugeridas por Lara (1991), Baldin et al. (2019), entre outros autores, se dividem em antixenose, antibiose e tolerância. Mais recentemente, Stout (2013) propôs uma abordagem alternativa, e considerou a necessidade de reavaliação dos conceitos, classificando as estratégias de defesa das plantas entre resistência e tolerância, demonstrando argumentos para a importância dessa nova terminologia para uso em estudos aplicados em resistência de plantas a insetos. Essas novas terminologias têm sido empregadas por diversos autores em trabalhos com resistência de culturas agrícolas a insetos e ácaros (Mitchell et al., 2016; Stenberg; Muola, 2017; Sperotto et al., 2018). Além disso, esses conceitos corroboram aqueles já utilizados em abordagens há mais tempo em estudos de natureza ecológica, evolutiva, e ecologia química das interações planta-inseto (Schoonhoven et al., 2005; Gatehouse, 2002) (Figura 1).

Resistência compreende o conjunto de características da planta que determinam se o inseto irá se alimentar mais ou menos dela, enquanto tolerância é a capacidade que a planta tem de suportar o ataque do inseto, regenerando seus tecidos e aumentando sua capacidade de crescimento sob ataque, ou seja, é a capacidade da planta de manter a produção mesmo com um determinado nível de infestação do inseto-praga. De acordo com Stout (2013), a nova definição poderia facilitar o entendimento dos conceitos de resistência de plantas em abordagens mais aplicadas, além de reiterar que em alguns casos não é possível distinguir os efeitos de antixenose dos de antibiose, fato constatado em diversos trabalhos na literatura. Considerando que as defesas das plantas sejam divididas em resistência e tolerância, a resistência seria subdividida em constitutiva/induzida e direta/indireta, enquanto a tolerância é apresentada separadamente, não sendo uma categoria de resistência, uma vez que não exerce efeitos negativos e pressão de seleção sobre os insetos, além de ser governada por outros agentes e mecanismos

fisiológicos. Contudo, a classificação em antixenose, antibiose e tolerância como categorias de resistência é clássica (Painter, 1951; Kogan, 1975; Lara, 1991). Por isso e pelo fato de a proposta de redefinição das terminologias ainda ser relativamente recente (Stout, 2013), a classificação tricotômica é ainda a mais aceita e empregada pelos pesquisadores (Smith, 2005; Hill et al., 2009; Baldin et al., 2018).

Independentemente dos termos técnicos e classificações, a resistência de plantas é uma importante tática de controle para ser usada no MIP na cultura do sorgo. Sendo uma cultura de baixo valor econômico em relação aos outros cereais, os demais métodos de controle se tornam onerosos para o custo de produção. Pelos diversos tipos de sorgo e sua ampla variabilidade genética, estudos de avaliação de resistência ainda são insipientes. Além disso, a resistência de plantas se adapta e se integra de forma compatível às demais táticas de controle de pragas dentro dos preceitos do MIP, possui interação com o controle biológico, aumentando sua eficiência, interferindo menos com os outros métodos de controle e no ambiente, diminuindo o uso de produtos químicos.

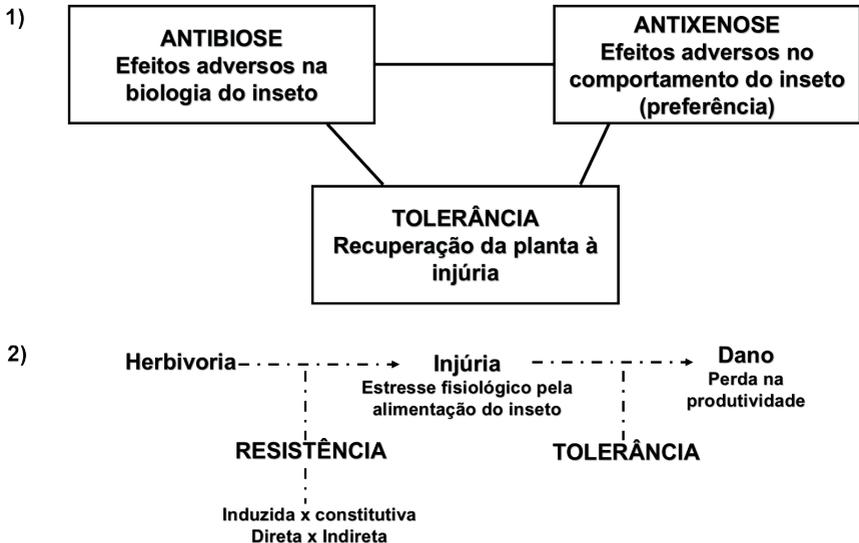


Figura 1. Comparação do esquema de categorização tricotômico clássico de Painter (1951) (1) e o esquema dicotômico proposto (2) por Stout (2013) para os estudos aplicados de resistência de plantas a insetos.

Fonte: Adaptado de Stout (2013).

Resistências de Plantas

A resistência de plantas é a soma relativa de qualidades hereditárias possuídas pela planta, as quais influenciam o resultado do grau de dano causado por um inseto (Painter, 1951). Assim, planta resistente pode ser definida como aquela que, por causa da sua constituição genotípica, é menos danificada que outras consideradas suscetíveis, em igualdade de condições (Rossetto, 1973).

Alguns princípios básicos da resistência de plantas a insetos devem ser observados. A resistência é relativa, o que implica a comparação de duas ou mais plantas; dessa forma, quando se diz que uma planta é resistente a um determinado inseto ou a um biótipo específico significa que ela assim se comporta em relação a outras plantas. A resistência é hereditária, isto é, trata-se de um caráter genético, de modo que as progênie de uma planta resistente devem se comportar da mesma forma quando testadas nas condições em que a resistência se revelou. A resistência é específica, ou seja, pode ser resistente a uma espécie de inseto e suscetível a uma outra espécie. Também apresenta plasticidade fenotípica de acordo com a interação do genótipo x ambiente, podendo alterar o fenótipo dependendo das condições ambientais, e isto pode implicar, por exemplo, o nível expresso de resistência. Além disso, é necessário que haja repetibilidade das respostas, ou seja, todas as vezes que se testar a variedade resistente em comparação com as outras variedades testadas, aquela característica deverá se manifestar (Lara, 1991; Baldin et al., 2019).

Classificação da Resistência de Plantas a Insetos

Quanto às formas de expressão das características de resistência, podem ser constitutivas e induzidas. A resistência constitutiva é de modo geral constantemente expressa na planta, e assim os genes que participam da codificação de substâncias químicas, características físicas e morfológicas são expressos em geral durante todos os estádios de desenvolvimento da planta. Por outro lado, a resistência induzida ocorre após o reconhecimento de algum estímulo ou fator de estresse, com a ação de elicitores, como o ácido jasmônico e silício, após a ocorrência de herbivoria ou oviposição, infecção por patógenos ou outro tipo de estresse biótico ou abiótico. Através do reconhecimento inicial destes elicitores por receptores de reconhecimento de padrões moleculares, as plantas apresentarão uma resposta induzida de

defesa, aumentando quantitativamente a produção de tricomas, enzimas antioxidantes e de defesa, compostos químicos tóxicos ou antinutricionais para o inseto, e expressando qualitativamente essas e outras características (Vendramim et al., 2019).

Além do modo de expressão dos genes e características de resistência, esta pode ser classificada como direta, como espinhos, tricomas, formato e espessura da parede celular, velocidade de crescimento celular, dureza dos tecidos atacados, incrustação de minerais, como silício na cutícula, presença de cera na superfície da folha, aumento da síntese de algum composto secundário ou enzimas oxidantes e de defesa que têm efeitos diretamente no inseto fitófago (Hoffmann-Campo; Graça, 2019; Vendramim et al., 2019).

Quando a planta é induzida de alguma forma, por exemplo, pela herbivoria de insetos, desencadeia mudanças na preferência, no desempenho ou na reprodução do inseto diante da planta hospedeira que vai fazer com que se alimente menos ou tenha uma redução de peso, alteração no desenvolvimento e, por fim, taxa de sobrevivência e oviposição, resultando em menor crescimento populacional. A resistência indireta compreende a produção de compostos orgânicos voláteis que a planta libera e que atraem inimigos naturais dos herbívoros que estão se alimentando daquela planta. As plantas liberam voláteis para comunicação entre elas e os herbívoros, orientando o comportamento de busca, atraindo ou repelindo para a aceitação ou não do hospedeiro, podendo afetá-los de diferentes formas, tanto na parte aérea quanto subterrânea. Existem também estruturas morfológicas produzidas de forma induzida nas plantas como os nectários extraflorais presentes em folhas e caules que podem ser utilizados como fonte de alimento, e as domácias, que são estruturas presentes em algumas plantas como cavidades ou tufos de pelos que servem como abrigo e alimento para os inimigos naturais (Silva; Panizzi, 2019).

Do ponto de vista genético, a resistência pode ser: monogênica (um locus), oligogênica (poucos loci) ou poligênica (muitos loci). A interação pode ser intra-alélica – a expressão da resistência pode ser recessiva; dominante ou com dominância incompleta, ou interalélica – a expressão da resistência pode depender de dois ou mais genes com ação complementar (sendo um único insuficiente); pode ser aditiva (dois genes não alélicos afetam a mesma característica) e epistática (um gene inibe a ação de outro).

Em relação à resposta entre as populações de plantas e a espécie da praga, existe a resistência horizontal que é quando a planta resistente expressa

o mesmo nível de resistência contra todos os biótipos do inseto-praga (raças semelhantes morfológicamente, mas com respostas diferenciadas em função da variação na população da planta) e vertical, quando a resistência é específica para cada biótipo do inseto-praga. Os fatores ambientais também podem afetar a expressão da resistência, como temperatura, luminosidade, umidade relativa, estágio de desenvolvimento da planta ou de seus tecidos, estado nutricional da planta e aplicação de defensivos e reguladores de crescimento.

Antixenose

Antixenose é a categoria de resistência responsável pela não preferência do inseto para se alimentar, ovipositar ou se abrigar em um determinado fenótipo de planta (Kogan; Ortman, 1978). Os insetos possuem diversificação na preferência porque eles utilizam estímulos fornecidos pelas plantas, os quais são responsáveis por desencadear respostas em favor ou contrárias à planta hospedeira. Os semioquímicos são estímulos químicos que regulam ou mediam a seleção hospedeira por insetos e podem ser subdivididos em dois grandes grupos: os aleloquímicos, que são interespecíficos, e os feromônios, que são intraespecíficos.

Em termos da interrelação inseto-planta, a importância deve ser atribuída ao grupo dos aleloquímicos, pois são substâncias que traduzem um significado comportamental e biológico a organismos pertencentes a espécies diferentes. Os aleloquímicos subdividem-se em cairomônios, alomônios, sinomônios e apneumônios. Cairomônios são as substâncias que, quando entram em contato com o indivíduo de outras espécies, como insetos, causam uma reação comportamental ou fisiológica favorável ao receptor e não ao emissor. Por outro lado, alomônios proporcionam o inverso da resposta, ou seja, é desfavorável ao receptor, mas não ao emissor. Sinomônios são substâncias que em contato com o indivíduo de outra espécie despertam uma reação comportamental ou fisiológica favorável a ambos, tanto ao emissor quanto ao receptor. São exemplos relacionados à resistência indireta, pois favorecem os inimigos naturais, atraindo-os, e também para as plantas, em razão do controle de pragas realizado pelos inimigos naturais atraídos para a planta. Por fim, apneumônios são compostos químicos que são emitidos por matéria morta e que resultam em uma reação comportamental ou fisiológica favorável ao receptor em um organismo que esteja dentro ou sobre o material emissor (Baldin et al., 2019; Silva; Panizzi, 2019).

Com relação às respostas desencadeadas pelos caimônios das plantas aos insetos, podem ser atraentes, atuando de forma que induz o inseto a se movimentar em direção à planta; arrestante, quando induz o inseto a se agregar à planta ou diminuir a locomoção para que eles avaliem melhor a planta em curta distância; excitante ou incitante, quando leva o inseto a provar a planta, ou seja, induz à picada ou “mordida” inicial, à penetração do ovipositor; e estimulante de alimentação ou oviposição, quando induz o inseto a continuar se alimentando ou ovipositando em uma planta adequada. Os alomônios presentes nas plantas provocam reações inversas às provocadas pelos caimônios, isto é, são desfavoráveis aos insetos e favoráveis às plantas. Eles podem ser classificados como repelentes, quando induzem o inseto a movimentar-se em direção oposta à planta; estimulantes de locomoção, quando induzem o inseto a se afastar mais rapidamente da planta; supressantes ou supressores, quando inibem ou evitam o início da alimentação (picada ou mordida), a penetração inicial ou a oviposição (inibição de oviposição, segundo alguns autores); e deterrentes, quando impedem a continuidade da alimentação ou oviposição. A resposta final do inseto depende do balanço entre os estímulos positivos e negativos, por exemplo, se o estímulo negativo repelente se sobrepuser ao atraente, o inseto não se orientará em direção à planta e vice-versa (Whittaker; Feeney, 1971) (Figura 2).

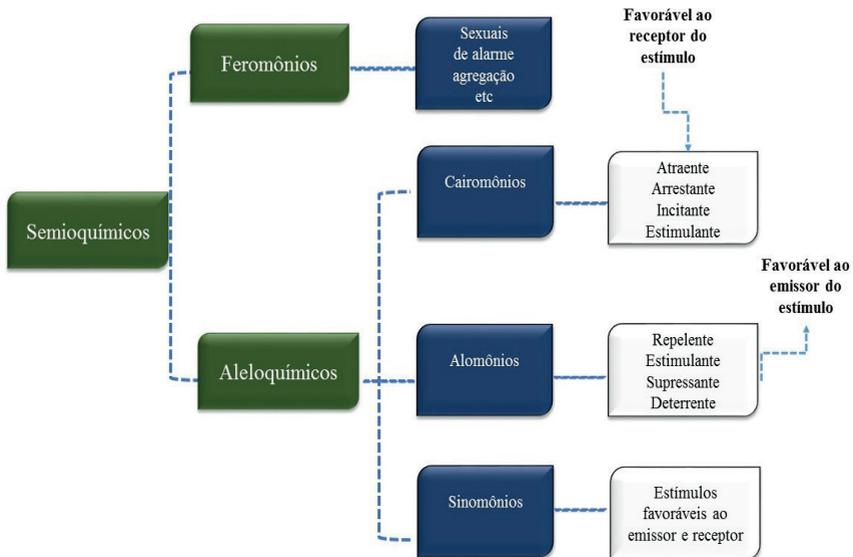


Figura 2. Estímulos emitidos pelas plantas e as respectivas respostas dos insetos.

Antibiose

Antibiose é a categoria de resistência preponderante nas plantas quando o inseto se alimenta normalmente e ela exerce um efeito adverso sobre a sua biologia, afetando direta ou indiretamente seu potencial biótico. Os efeitos negativos nos insetos podem ser por causa das toxinas que as plantas apresentam, por exemplo, a presença de inibidores de crescimento ou reprodução, nutrição inapropriada que causam mortalidade nas fases de larva, ninfa, pupa ou na muda, redução do tamanho e peso dos indivíduos e da fecundidade, alteração da proporção sexual e da longevidade, entre outros parâmetros biológicos.

O efeito adverso que a planta exerce sobre parâmetros da biologia do inseto e que faz com que a planta apresente antibiose pode ser pela presença de compostos antibióticos que atuam na fisiologia e biologia do inseto, e podem ser: metabólitos tóxicos que atuam produzindo intoxicação crônica ou aguda nos insetos, como alcaloides, glicosídeos cianogênicos e cardíacos, quinonas, etc.; antimetabólitos que têm a propriedade de tornar os nutrientes essenciais indisponíveis aos insetos ou atuar como inibidores enzimáticos; enzimas que atuam no processo de utilização do alimento, inibindo ou reduzindo o processo normal da digestão; fitoesteroides, como alguns triterpenos, saponinas e tetranortriterpenoides, como a azadiractina, que podem agir no inseto como seu próprio hormônio juvenil, ou como hormônio da ecdise, que induzem a metamorfose precoce, esterilidade e diapausa em razão do desequilíbrio hormonal (Vendramim et al., 2019).

Tolerância

Tolerância ocorre quando a planta resistente, mesmo atacada da mesma forma que as outras plantas suscetíveis, consegue se recuperar, crescer e produzir normalmente. A tolerância é caracterizada pela presença de atributos que não interferem sobre o inseto nem na sua biologia e nem no seu comportamento, sendo uma característica que faz com que a planta sofra menos com o ataque do que outras em igualdade de condições. Muitas plantas podem suportar uma determinada relação de injúrias sem ter perda de rendimento (Peterson et al., 2017; Erb, 2018; Sperotto et al., 2018). Desta forma, insetos-praga não selecionados quanto à resistência por causa da ausência de pressão de seleção imposta por plantas tolerantes (Koch et al., 2019).

A tolerância, apesar da sua importância, tem sido menos utilizada e estudada do que a antibiose e antixenose. Isto pode ser devido a vários fatores, por exemplo, a grande influência ambiental tornando mais difícil a identificação e seleção de plantas resistentes. Além disso, os mecanismos da tolerância ainda são pouco compreendidos, complexos e de herança poligênica, tornando o processo mais lento. Por outro lado, o interesse das empresas e dos produtores que utilizam as variedades resistentes é reduzir a incidência da praga ao invés de gerenciar a biologia das plantas (Peterson et al., 2017; Erb, 2018; Sperotto et al., 2018). E mesmo que os insetos não tenham alterações biológicas e/ou comportamentais, o entendimento básico de como as plantas lidam com a herbivoria e a identificação de genótipos tolerantes nas principais culturas pode ter um grande impacto no manejo de pragas e rendimentos de produção.

Lembrando que a resposta das plantas à injúria depende da intensidade, do tempo, do tipo e da parte da planta que foi injuriada e das interações com fatores ambientais (Peterson; Higley, 2001). A tolerância de plantas a insetos sugadores está principalmente associada a mecanismos moleculares, como desintoxicação e alterações na atividade fotossintética, enquanto os mecanismos de tolerância em resposta a insetos mastigadores são geralmente descritos por sobrecompensação através da produção de novos tecidos, realocação de recursos e mudança na arquitetura da planta (Trumble et al., 1993; Stowe et al., 2000; Krimmel; Pearse, 2016).

Peterson et al. (2017) listam três fatores que restringem o desenvolvimento de conhecimentos sobre a tolerância: falta de técnicas adequadas para identificar e incorporar a tolerância para as culturas; a capacidade de cultivares tolerantes servirem como reservatórios para vetores de vírus, por exemplo, e a falta de informações básicas sobre a herança da tolerância. Para isto, devem-se realizar pesquisas básicas sobre os mecanismos fisiológicos e bioquímicos de tolerância, as quais devem envolver estudo interdisciplinar entre biólogos, ecologistas, químicos, biólogos moleculares, melhoristas de plantas e entomologistas, para utilizar cada vez mais esta importante ferramenta no MIP.

Testes Para a Avaliação da Resistência de Plantas a Insetos

Para definir a melhor metodologia para avaliação da resistência é necessário conhecer bem a fenologia da planta, o sistema de produção e os aspectos do manejo e biologia do inseto-praga em questão.

Para avaliação de resistência de plantas a insetos, normalmente são utilizados três tipos de ensaios: livre-escolha – quando todos os genótipos são oferecidos aos insetos simultaneamente, e podendo-se avaliar variáveis tanto do inseto quanto da planta para discriminar os tipos contrastantes; confinamento – quando os genótipos são oferecidos separadamente aos insetos sem chance de escolha; e teste de produção – quando se considera a produtividade do componente comercial da planta visando detectar tolerância à espécie-alvo. Estes ensaios podem ser realizados em campo, casa de vegetação ou laboratório, como avaliação da biologia do inseto, produtividade da planta, notas de injúrias de insetos na planta, avaliação de parâmetros da planta e do inseto, por exemplo, índice de infestação, percentagem de colmos atacados, entre outros (Lara; Perussi, 1984; Waquil et al., 2001, 2019).

Vale a pena ressaltar que a infestação natural ou artificial de insetos, seja em campo, casa de vegetação ou laboratório, deve ser de maneira uniforme, certificando-se de que não houve plantas sem infestação para que não tenha um possível erro na identificação de genótipos suscetíveis como sendo resistentes.

Resistência do Sorgo a Insetos-Praga

A Cultura do Sorgo e suas Pragas

O sorgo é considerado uma planta rústica, que tem boa adaptação a diferentes condições ambientais, podendo produzir bem em condições que seriam desfavoráveis à maioria dos outros cereais (Silva et al., 2017). Existem diferentes tipos de sorgo: o granífero, destinado à produção de grãos; o forrageiro, para produção de silagem; o sacarino, para produção de etanol; o vassoura, utilizado para fabricação de vassouras; e o biomassa, usado para geração de energia em usinas termelétricas (Figura 3 e 4) (Vilela et al., 2017). Além disso, as plantas e lavouras com as diferentes aptidões supracitadas possuem porte, ciclo de cultivo e tratos culturais diferenciados. Nesse sentido, as infestações de insetos-praga podem ter importâncias

distintas dependendo do grupo de sorgo. Além disso, os diferentes genótipos de sorgo dentro de cada grupo podem apresentar grandes diferenças em características bioquímicas, como no teor de açúcares solúveis, lignina e minerais (Chupin et al., 2017), e estas características podem ser benéficas para a resistência a insetos-praga.

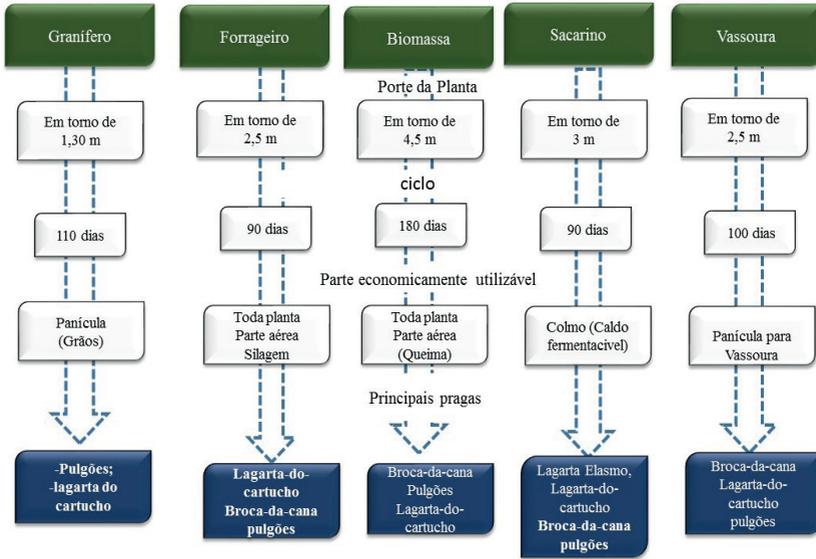
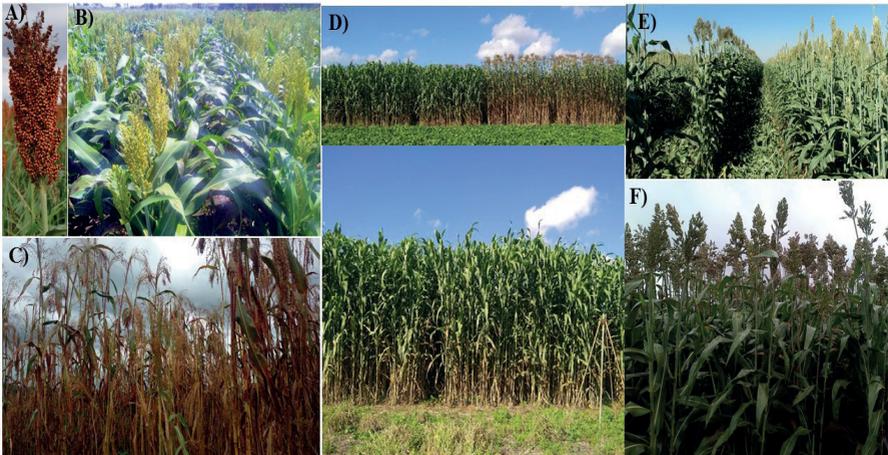


Figura 3. Os tipos de sorgo, suas características e principais pragas-alvo.



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 4. A) Panícula de sorgo granífero na maturação fisiológica; B) sorgo granífero; C) sorgo vassoura. D) sorgo biomassa; E) sorgo sacarino; F) sorgo forrageiro.

Na fase inicial de desenvolvimento do sorgo, a cultura pode ser atacada por diversas espécies de insetos fitófagos. Entre os mais importantes se destacam os corós (*Phyllophaga* spp., *Stenocrates* spp., *Cyclocephala* spp., *Diloboderus* spp.) (Coleoptera: Scarabaeidae), cupins (*Heterotermes* spp., *Syntermes* spp., *Proconitermes* spp.) (Isoptera: Termitidae), larvas-alfinetes *Diabrotica speciosa* (Germar, 1824) e *Diabrotica viridula* (Fabricius, 1801) (Coleoptera: Chrysomelidae), percevejos-castanhos *Scaptocoris castânea* (Petry, 1830) e *Atarsocoris brachiariae* (Becker, 1996) (Hemiptera: Cydnidae), percevejo-preto *Cyrtomenus mirabilis* (Hemiptera: Cydnidae), lagarta-elasma *Elasmopalpus lignosellus* (Zeller, 1848) (Lepidoptera: Pyralidae), larva-aramé *Conoderus escalearis* (Germar, 1824) (Coleoptera: Elateridae), larva-angorá *Astylus variegatus* (Germar, 1824) (Coleoptera: Dasytidae) e os percevejos-barriga-verde *Dicerus furcatus* (Fabricius, 1775) e *Dicerus melacanthus* (Dallas, 1851) (Hemiptera: Pentatomidae) (Mendes et al., 2014).

Na fase vegetativa do sorgo podem-se encontrar os pulgões *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) e *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Hemiptera: Aphididae), lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797), curuquerê-dos-capinzais *Mocis latipes* (Guennée, 1852) (Lepidoptera: Noctuidae), e a broca-do-colmo *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae). Por fim, na fase reprodutiva merecem destaque a mosca-do-sorgo *Stenodiplosis* (=Contarinia) *sorghicola* (Coquillett) (Diptera: Cecidomyiidae), os percevejos-da-panícula *Leptoglossus zonatus* (Dallas, 1852) (Hemiptera: Coreidae), *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758), *Thyanta perditor* (Fabr., 1794) (Hemiptera: Pentatomidae), *Sthenaridea carmelitana* (Carvalho, 1948) (Hemiptera: Miridae), e a lagarta *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850) (Lepidoptera: Noctuidae) (Waquil et al., 2003).

Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, geralmente a cultura do sorgo é implantada no período de segunda safra, logo após a colheita de soja precoce. Isto faz com que pragas remanescentes nos restos desta cultura possam migrar para as culturas do sorgo e do milho, como tem recentemente ocorrido com o percevejo-barriga-verde *D. melacanthus*. Este percevejo causa danos significativos às plantas de milho e sorgo no início do desenvolvimento vegetativo, reduzindo o vigor, promovendo o perfilhamento precoce e podendo até matar a planta (Figura 5) (Waquil; Oliveira, 2009; Correa-Ferreira; Sosa-Gomez, 2017).



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 5. *Dicerus melacanthus* se alimentando de planta de sorgo (A), injúrias causadas pela alimentação de *D. melacanthus* em sorgo.(B)

Na safra 2018/2019 foi observada nos plantios de sorgo, principalmente em sorgo granífero, alta infestação atípica do pulgão da cana-de-açúcar *Melanaphis sacchari* (Zethner, 1897) (Hemiptera: Aphididae) (Figura 6). Este pulgão é considerado como uma forte ameaça à cultura do sorgo não só no Brasil, mas também nos Estados Unidos desde 2013 (Paudyal et al., 2019). Entre todas as pragas do sorgo, a broca-do-colmo *D. saccharalis* é considerada a mais importante para o sorgo sacarino por causar injúrias diretamente na parte econômica da planta, que é o colmo (Figura 7). Juntamente com *S. frugiperda* (Figura 8), *D. melacanthus*, *S. graminum* e mais recentemente *M. sacchari*, são consideradas as pragas-chave da cultura do sorgo, e assim demandam mais atenção no monitoramento e controle.

O ataque de pragas pode ser um importante fator na perda de produtividade do sorgo, reduzindo a expressão do seu potencial. Dessa forma, torna-se muito importante o uso de diferentes táticas de controle no manejo das pragas dessa cultura (Mendes et al., 2014). Diante disso, selecionar genótipos resistentes ou tolerantes às principais pragas do sorgo é de suma importância para programas de melhoramento genético e de MIP. A seguir serão exemplificados algumas metodologias experimentais e resultados com genótipos de sorgo das principais pragas da cultura.



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 6. Pulgão *Melanaphis sacchari*.



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 7. *Diatraea saccharalis* em galeria no colmo de sorgo e as respectivas injúrias.



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 8. *Spodoptera frugiperda* no cartucho de plantas de sorgo.

Broca-do-colmo

A broca-do-colmo ou broca-da-cana-de-açúcar, *D. saccharalis*, é uma praga importante para a cana-de-açúcar, mas por ser polífaga se alimenta de várias outras culturas e tem causado perdas significativas no milho, trigo, sorgo e no milheto, todas consideradas de grande importância econômica (Mendes et al., 2014). Pelo comportamento alimentar formando galerias, a praga se encontra protegida, dificultando o seu controle químico. Dessa forma, a utilização de genótipos resistentes e tolerantes é a tática de controle mais promissora para o manejo de *D. saccharalis* nosorgo (Mendes et al., 2014; Santos; Mihsfeldt, 2014). Na cultura do sorgo ela pode danificar tanto o colmo como o pedúnculo da panícula. Quando o dano é no colmo, causa quebraimento e redução na produção, e quando é no pedúnculo causa morte da panícula, provocando o sintoma de panícula-branca, com 100% de perda da planta atacada no caso do sorgo granífero.

As galerias provocadas pelas lagartas de *D. saccharalis* deixam as plantas mais vulneráveis à queda pela ação do vento, o que é um prejuízo indireto muito importante: o colmo fica enfraquecido, podendo quebrar ou

tombar. O ataque da broca-do-colmo causa podridão por favorecer a entrada de microrganismos, causando o acúmulo de micotoxinas, morte da gema apical, redução do fluxo de seiva, encurtamento dos entrenós dos colmos e acamamento, debilitando a planta de forma geral (Mendes et al., 2014; Silva et al., 2014).

O adulto é uma mariposa de coloração amarelo-palha, de 20 mm de envergadura. Os ovos têm aspecto de escamas; inicialmente possuem coloração amarelo-clara, alaranjada e vão escurecendo quando estão perto de eclodirem. Os ovos são colocados nas folhas, e a eclosão das lagartas ocorre entre quatro e nove dias. Inicialmente, as lagartas se alimentam das folhas, passam para a bainha e depois se direcionam para o colmo, fazendo galerias ascendentes e originando um orifício por onde a mariposa sai após a fase de pupa, que pode variar de nove a 14 dias (Mendes et al., 2014).

A maioria dos trabalhos com avaliação de genótipos de sorgo para a resistência a *D. saccharalis* e outros lepidópteros no país foram realizados há mais de 15 anos. Entre esses trabalhos, Bortoli et al. (2005) ao avaliarem o efeito da adubação em uma cultivar de sorgo no desenvolvimento de *D. saccharalis* observaram que as menores porcentagens de injúria foram verificadas com as menores doses de nitrogênio e maiores doses de potássio.

Normalmente, as avaliações são baseadas na taxa de plantas com panículas mortas, nos índices de infestação (% plantas infestadas) e de intensidade de infestação (% de internódios danificados). Para se avaliar esses índices, deve-se abrir o colmo longitudinalmente (Figura 9) e examinar colmo por colmo. Pode-se utilizar também uma escala visual de notas (variando de 0 a 9 com base na área foliar destruída) para se estimar os danos causados pelas lagartas nas folhas. Muitas fontes demonstraram resistência cruzada a diferentes espécies de brocas, como as IS 1055 (BP53), IS 1044, IS 2123, IS 2195, IS 2205, IS 5469 e IS 18551.

As variedades brandes, AF 28 e SC 3541, foram consideradas as mais resistentes à broca-do-colmo (Waquil et al., 1980; Boiça Júnior; Lara, 1983; Lara et al., 1997). Entre as cultivares comerciais, os resultados mostraram que o BR 304 e o CMSXS9701 apresentaram os menores índices de infestação enquanto Z 732 e Esmeralda destacaram-se com os menores índices de intensidade de infestação (Waquil et al., 2001). Os autores encontraram alta variabilidade genética entre os materiais comerciais, e perdas significativas na produtividade poderão ocorrer em todos os híbridos avaliados. Por outro lado, a variabilidade genética observada entre as linhagens de sorgo indica

grande potencial para a seleção de cultivares resistentes nos programas de melhoramento (Waquil et al., 2001).

Lara et al. (1979) encontraram resistência em dois genótipos de sorgo entre 89 avaliados para *D. saccharalis*, e após quase duas décadas também foram encontrados dois genótipos com resistência indireta (denominada pelo autor de resistência extrínseca) a *D. saccharalis*, considerando o maior parasitismo por *Cotesia flavipes* (Cameron, 1891) (Hymenoptera: Braconidae) (Lara et al., 1997). Genótipos de sorgo, 10 híbridos de sorgo sacarino e 16 de sorgo biomassa, foram avaliados em relação à resistência a *D. saccharalis*, com destaque para o genótipo CMSXS647 pelas características altura de plantas, nível de infestação, tamanho de galerias e teor de sólidos solúveis entre os sacarinos, enquanto entre os genótipos de sorgo biomassa se destacaram CMSXS7030, CMSXS7012 e CMSXS7028, os quais apresentaram características desejáveis para nível de infestação, altura de plantas e número de compostos lignocelulósicos (Araújo et al., 2019).



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 9. Avaliação do comprimento da galeria causada pela alimentação de *Diatraea saccharalis* em sorgo granífero.

Lagarta-Elasmo

A lagarta-elasmo (*Elasmopalpus lignosellus*) é uma praga cujos adultos são pequenas mariposas de cor cinza e de hábitos noturnos. Os ovos, diminutos e amarelados, são colocados no solo e em folhas de plantas recém-emergidas. As injúrias são causadas pela lagarta que raspa o tecido vegetal,

e em seguida penetra na planta na altura do colo, logo abaixo do nível do solo, onde cava uma galeria ascendente, provocando inicialmente murcha e posteriormente morte das folhas centrais, resultando no sintoma conhecido como “coração morto”. Esta é uma espécie de ocorrência esporádica, com grande capacidade de destruição em um intervalo curto de tempo. Seus danos estão associados à estiagem logo após a emergência das plantas. O déficit hídrico retarda o desenvolvimento da planta, aumentando o período de suscetibilidade e favorecendo a explosão populacional. Maiores danos são observados em solos leves e bem drenados, sendo sua incidência menor sob plantio direto (Santos et al., 2005).

Sendo esta espécie de ocorrência específica na região tropical das Américas, pouco se tem feito sobre a avaliação do germoplasma para resistência à lagarta-elasma. No Brasil, Waquil et al. (1998), avaliando a resposta da coleção de híbridos comerciais de sorgo granífero através de infestação artificial em casa de vegetação, observaram alto nível de suscetibilidade desses híbridos. A média do ensaio foi de 69,4% de plantas mortas, e a melhor resposta foi obtida com os híbridos A 9902 e Turquesa, com 57% de mortalidade das plantas.

Em um experimento com 47 linhagens de sorgo, Viana et al. (2012) encontraram uma alta variação nos resultados. A percentagem de plantas atacadas pela lagarta-elasma variou de 27 a 100%. Entre as linhagens avaliadas, 10 tiveram menos de 50% de plantas atacadas, 21 mostraram nível de ataque intermediário, variando de 52 a 75%, e 16 linhagens apresentaram elevado ataque, variando entre 80 e 100%. A linhagem menos danificada foi TX 614B, com 27% de plantas atacadas, seguida das linhagens (TX623BXATF54B) 6-3-C-10-1-1-B, (TX623BXATF54B) 6-1-C-4-2-2-1B, (TX623BXATF54B) 6-1-C-5-1-1-B, IS 10258B, IS 10258B e N 123B, variando de 30 a 42%.

Lagarta-do-Cartucho

A espécie *S. frugiperda* possui distribuição geográfica generalizada, causando danos durante, praticamente, todas as fases do seu desenvolvimento do milho (Dequech et al., 2013). Em geral, o sorgo é mais resistente que o milho à lagarta-do-cartucho. Entretanto, há cultivares de sorgo que são tão suscetíveis a essa espécie quanto o milho. Condições tropicais de cultivo aliadas às características dessa espécie, como polifagia e alta capacidade de reprodução, dispersão e migração dos adultos (Nagoshi; Meagher, 2008),

favorecem a ocorrência de gerações sobrepostas ao longo do ano, levando a graves infestações em safra agrícola (Bernardi et al., 2015).

O adulto de *S. frugiperda* é uma mariposa com aproximadamente 3,5 cm de comprimento, coloração pardo-escuro nas asas anteriores e branco-acinzentada nas posteriores, com longevidade de aproximadamente 15 dias (Santos et al., 2004). As posturas são feitas em massa, com média de 150 ovos. O período para eclosão das larvas é de aproximadamente três dias.

As larvas recém-eclodidas alimentam-se do próprio córion dos ovos e, posteriormente, das folhas da planta, provocando o sintoma conhecido como “folhas raspadas”, que é um sinal da presença da lagarta na cultura. As lagartas passam por cinco ou seis estádios larvais, atingindo 40 mm a 50 mm de comprimento e 2,7mm a 2,78 mm de largura da cápsula cefálica. À medida que as lagartas crescem, começam a fazer orifícios nas folhas, podendo causar severas injúrias às plantas (Cruz et al., 1995). A duração da fase larval é de 12 a 30 dias. Após este período, as lagartas se direcionam para o solo onde passarão à fase de pupa, que dura entre 10 e 12 dias. O ciclo biológico desse inseto em plantas de milho completa-se em 25 dias à temperatura de 25 °C, aumentando o número de dias quando as temperaturas estão mais baixas (Busato et al., 2005a, 2005b).

Os primeiros trabalhos que tentaram identificar fontes de resistência do sorgo à lagarta-do-cartucho foram realizados por McMillian e Starks (1967), nos Estados Unidos, e por Lucena (1978), no Brasil. Mesmo considerando o pequeno número de fenótipos avaliados foi possível identificar tipos contrastantes como AF-28 (menor índice de infestação) e EA 261 (menor consumo de biomassa). Entre 20 variedades de sorgo sacarino, foi observada uma redução no consumo das lagartas de 44% da área foliar da variedade Honey quando comparada à variedade Dale (Waquil; Santos, 1990). A avaliação de 18 acessos de sorgo selecionados, previamente, para resistência à lagarta-do-cartucho, de 326 acessos do Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Milho e Sorgo, Santos et al. (1992), identificou como resistentes: AF 28; MN 1533; IS 5831, que causaram 67% de mortalidade de larvas, e Tx 7078 e BTx 611 wx, que apresentaram menor área foliar destruída. Novos estudos precisam ser realizados para verificar a viabilidade da transferência dessa característica para cultivares comerciais (Santos et al., 2005).

Como a distribuição da infestação natural no campo é muito irregular, a seleção sob infestação natural fica prejudicada. Desta forma, como a lagarta-do-cartucho é relativamente fácil de ser criada em laboratório, os trabalhos

mais recentes têm sido conduzidos com infestação artificial, que podem ser conduzidos em laboratório, casa de vegetação ou no campo. Para avaliar a resistência à desfolha por *S. frugiperda* existem escalas de notas de injúria, de modo que de acordo com a intensidade da injúria maior será a nota atribuída. Entre as escalas de injúria no milho destacam-se a de 0-5 desenvolvida por Carvalho (1970) e a de 1-9 desenvolvida por Davis e Williams (1989). Gonçalves et al. (2011) também atribuíram notas de 1-5 para injúrias de *S. frugiperda* em diferentes genótipos de sorgo sacarino (Figura 10). Gonçalves et al. (2011) avaliaram através de escala de notas (0-5) genótipos de sorgo sacarino em casa de vegetação aos 14 dias após a infestação das lagartas. Segundo os autores, o índice de adaptação das lagartas aos genótipos de sorgo sacarino seguiu a seguinte ordem decrescente (do mais adaptável aos menos adequados à lagarta-do-cartucho): BR505, CMSX5634, BR501, CMSX5642 e CMSX5630.

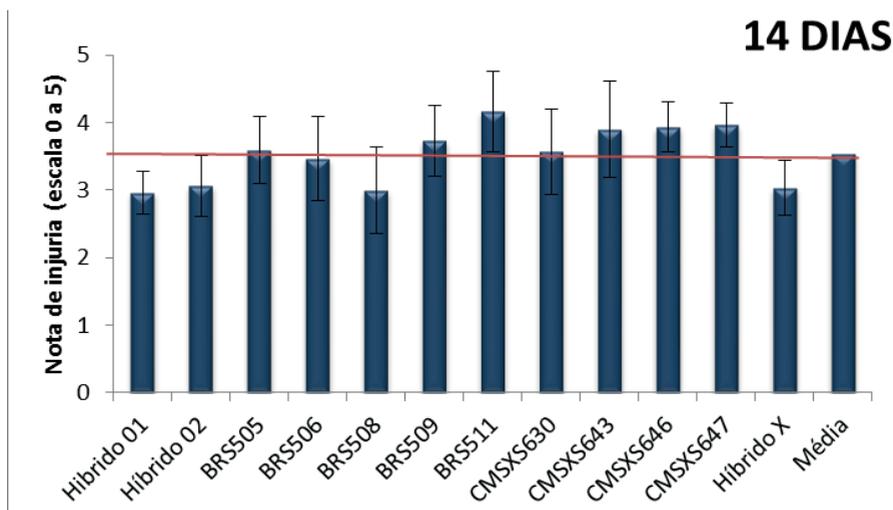


Figura 10. Notas de injúria pela escala 0-5 (Carvalho, 1970) causadas por *Spodoptera frugiperda* aos 14 dias após a infestação em casa de vegetação para genótipos de sorgo sacarino. Sete Lagoas-MG, 2014 (Gonçalves et al., 2011).

Na avaliação da adubação nitrogenada em sorgo, López et al. (2000) não verificaram correlação significativa entre parâmetros de desenvolvimento da lagarta-do-cartucho e a concentração total de nitrogênio nas plantas. Ao avaliar três cultivares comerciais de sorgo quanto à infestação de *S. frugiperda*, Cortez e Waquil (1997) encontraram grande variação nos

parâmetros avaliados, sugerindo que haja constante avaliação de genótipos com potencial para se utilizar a resistência do sorgo no MIP.

Pulgão-Verde

Nas regiões tropicais, os pulgões reproduzem-se por partenogênese telitóca, na qual fêmeas produzem apenas fêmeas. Portanto, têm grande potencial biótico e formam grandes colônias. Em condições favoráveis, podem produzir de três a quatro gerações por mês. Esta praga infesta o sorgo desde a emergência das plantas até a maturação dos grãos.

Os adultos e as ninfas de *S. graminum* (Figura 11) apresentam coloração verde-limão, com três riscas mais escuras no dorso e se alimentam na face inferior ou na bainha das folhas mais maduras.



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 11. Pulgão *Schizaphis graminum*.

As ninfas passam por quatro instares e atingem a maturidade em cinco dias. Cada fêmea pode produzir até 100 descendentes nos seus 25 dias de longevidade. Tanto os adultos como as ninfas sugam seiva das folhas e introduzem toxinas que provocam bronzeamento e morte da área afetada, que dependendo da infestação podem causar a morte da planta. Os adultos, principalmente as formas aladas, são também importantes vetores de vírus, como o do mosaico-da-cana-de-açúcar, capaz de causar danos significativos ao sorgo. Por causa da intensa sucção de seiva, os insetos produzem um volume significativo de excrementos que cobrem a face superior das folhas

baixeiras, deixando-as pegajosas ou cobertas com uma camada escura de fungo (fumagina) (Santos et al., 2005; Mendes et al., 2014).

Para a avaliação de genótipos resistentes, tanto de plântulas em casa de vegetação como de plantas adultas no campo, pode-se usar uma escala visual de notas de 0 (plantas sem injúria), 1 (plantas com 1 a 20% de injúria), 2 (plantas com 21% a 40% de injúria), 3 (plantas com 41 a 60% de injúria), 4 (plantas com 61 a 80% de injúria), 5 (plantas com 81 a 99% de injúria) e 6 (plantas mortas) (Stark; Burton, 1977). Pode-se também examinar o aumento da população e biomassa dos pulgões no momento da avaliação.

Fontes de resistência de sorgo ao pulgão-verde foram encontradas em diferentes espécies do gênero *Sorghum*, como IS 809 e PI 264453 (*S. bicolor*), KS 30 (*S. virgatum*), SA 7536-1 (*S. nigricans*), PI 302236 (*S. hewisonii*), PI 220248 e PI 308976 (*S. sudanense*) e PI 38108 (*S. virgatum*). Em algumas das fontes de resistência, a herança é simples e com dominância incompleta (IS 809, SA 7536-1 e PI 264453), mas em outras, derivadas de *S. virgatum*, a dominância é completa e determinada por mais de um locus (Santos et al., 2005).

Para determinar o tempo ideal para a avaliação da preferência do pulgão-verde por genótipos de sorgo após a infestação, foram conduzidos experimentos em casa de vegetação com *S. graminum*, envolvendo cultivares de sorgo resistentes a essa espécie. Cruz et al. (1998) concluíram que 72 horas após a infestação foi o tempo ideal para se fazer a avaliação da antixenose.

Foi demonstrado que variedades de sorgo com elevados teores de fenóis são resistentes a *S. graminum*, apresentando menor taxa de alimentação nessas variedades (Reese, 1981). Em um estudo realizado com quatro híbridos de sorgo, Dogramaci et al. (2007) conseguiram separar os híbridos quanto à tolerância e antibiose para *S. graminum* biótipo I, sendo a antibiose a principal característica do híbrido Cargill 607E, e a tolerância para Cargill 797, enquanto Golden Harvest 510B e Garst 5715 foram suscetíveis.

Wu e Huang (2008) mapearam QTLs de sorgo para a resistência a *S. graminum* biótipo I, o que facilitará a identificação de genes de resistência ao pulgão-verde nas plantas e o desenvolvimento de métodos de seleção assistidas por marcadores para reprodução de novas cultivares resistentes, pois várias regiões genômicas do sorgo foram envolvidas na resistência ao biótipo I do pulgão-verde (Agrama et al. 2002; Nagaraj et al., 2005). Em avaliação da resistência de 20 híbridos comerciais de sorgo no México, Aranda-Lara et al. (2019) concluíram que os híbridos TX-05, TX-02,

Jeronimo, Apache e TX-04 apresentaram menores infestações de pulgões e maior produtividade.

Pulgão-da-Cana-de-Açúcar

O pulgão-da-cana *M. sacchari* é uma das principais pragas de sorgo e cana-de-açúcar em muitas regiões da África, Ásia, Austrália, do Extremo Oriente e partes da América Central e do Sul (Singh et al., 2004). No Brasil, foi observado nos plantios de sorgo, em especial, do sorgo granífero, alta infestação na safra de 2018/2019, infestação está ainda não registrada no país. Nos últimos anos, essa espécie tem se transformado numa forte ameaça para o sorgo no Brasil e nos Estados Unidos (Paudyal et al., 2019).

O pulgão possui coloração amarelo-limão, sendo que alguns têm linhas negras padronizadas ao longo do esclerito dorsal (Eastop, 1954; Blackman; Eastop, 1984). As ninfas passam por quatro instares, e chegam à fase adulta entre quatro e cinco dias (Chang et al., 1982; Manthe, 1992). Os adultos podem sobreviver por 10 a 28 dias (Van Rensburg, 1973; Chang et al., 1982).

Normalmente o sorgo é colonizado com infestações significativas na planta mais desenvolvida (Van Rensburg, 1973). Ocorre inicialmente a descoloração das folhas, seguida de clorose, necrose, nanismo, atraso na floração e redução no enchimento de grãos, envolvendo perdas de qualidade e quantidade. O pulgão-da-cana-de-açúcar se alimenta da superfície abaxial das folhas mais velhas da planta (Singh et al., 2004).

Ensaio em casa de vegetação e campo com cruzamentos entre os genótipos PI 257595 (altamente resistente), 129-3A (moderadamente resistente) e RTx 430 (suscetível) mostraram que a resistência é monogênica e controlada por um único gene dominante (Hsieh; Pi, 1982; Tan et al., 1985). Singh et al. (2004) em uma revisão listaram várias fontes de resistência de sorgo a *M. sacchari* em diferentes países: IS 44 (Estados Unidos), IS 84 (México), IS 1063 (Índia), IS 12551C (SC 31) (Etiópia), IS 12599C (SC 90) (Congo), IS 14048 (Malawi), 129-3A (África do Sul), 4692A (Japão), AB 31 (China), PNR 8537 (Botsuana), entre várias outras.

Testes de livre escolha e sem escolha foram conduzidos com 23 genótipos de sorgo quanto à resistência a *M. sacchari*. Estes genótipos foram comparados a genótipos com informações de resistência e suscetibilidade previamente conhecidos, e, com isso, foi possível selecionar os genótipos AG1201, AG1301, W844-E e DKS 37-07, identificados com expressão de

tolerância, antibiose e antixenose; H13073 expressou antibiose; e GW1489 expressou tolerância e antibiose (Paudyal et al., 2019).

Armstrong et al. (2015) testaram fontes de resistência a *S. graminum* para *M. sacchari* e encontraram genótipos resistentes a *S. graminum* e que também foram resistentes a *M. sacchari*. A linhagem RTx2783, resistente ao pulgão-verde biótipos C e E, foi resistente ao pulgão-da-cana-de-açúcar nos testes em casa de vegetação e em campo. O genótipo PI 55610, resistente aos biótipos B, C e E de *S. graminum*, manteve resistência moderada ao pulgão-da-cana-de-açúcar. Duas linhagens e dois híbridos do programa de melhoramento do Texas A&M B11070, B11070, AB11055-WF1-CS1 / RTx436 e AB11055-WF1-CS1 / RTx437 foram altamente resistentes ao pulgão-da-cana, assim como os tipos parentais SC110, SC170 e linhas da África do Sul Ent62 / SADC, (Macia / TAM428) -LL9, (SV1 * Sima / IS23250) -LG15.

Perales-Rosas et al. (2019) identificaram no México uma menor preferência (antixenose) de *M. sacchari* pelos híbridos Amber, P15 e Milenia, e tolerância foi verificada nos híbridos Âmbares, Cobalto e 85 P 20.

Mosca-do-Sorgo

A espécie *S. sorghicola* compreende pequenas moscas de coloração alaranjada, normalmente observadas ovipositando em flores abertas do sorgo. A mosca-do-sorgo causa danos diretamente nos grãos em formação, e as espiguetas infestadas são totalmente perdidas. As infestações podem chegar a níveis elevados, causando perdas totais nas lavouras de sorgo granífero. Como as larvas se alimentam da cariopse em formação, os danos são vistos somente após a granação, quando é observado um grande número de espiguetas chochas (Santos et al., 2005).

A principal dificuldade para selecionar genótipos de sorgo resistentes está na manipulação da população natural para se fazer a seleção. O que tem sido recomendado, para fazer seleção é o uso de áreas onde a mosca têm ocorrência endêmica. Adicionalmente, podem-se utilizar bordaduras, semeadas cerca de duas semanas antes da instalação dos ensaios ou dos campos de seleção para aumentar a população da mosca no local. Um método eficiente para avaliar a resistência a *S. sorghicola* em laboratório está ilustrado na Figura 12, onde as moscas presentes nas panículas dentro da caixa são atraídas pela luz e capturadas no frasco de vidro, onde podem ser contabilizadas; no entanto, estas panículas infestadas já estavam no campo.

As avaliações das injúrias são feitas quando os grãos estão no estágio leitoso, utilizando uma escala visual de notas variando de 0 (sem danos) a 9 (acima de 90% de grãos chochos), com intervalos de 10% de grãos danificados para cada unidade da escala (Santos et al., 2005).



Fotos: Simone Martins Mendes

Figura 12. Metodologia de avaliação de resistência de sorgo a *Stenodiplosis sorghicola*.

Na Costa do Ouro, na África, a variedade Nunaba foi considerada resistente à mosca, sendo cerca de 10 vezes menos infestadas que as variedades testemunhas (Bowden; Neve 1953). Nos Estados Unidos, em 1962, do total de 216 linhagens após cinco anos de seleção foram obtidas 11 variedades, que se mostraram menos atacadas pela mosca (Wiseman; McMillian, 1968) e foi registrado o genótipo SGIRL MR-1 com resistência moderada a *S. sorghicola* (Wiseman et al., 1973). Na Índia, foi registrada a cultivar DJ 6514 como resistente à mosca. No Brasil, em Campinas-SP, Rossetto e Banzatto (1967) observaram que as variedades AF-28, AF-112 e B. Leoti sofreram muito pouco dano em relação à “A. orange”, AF-37, M.35.1 e AF-114, concluindo que as variedades AF-28 e AF-112 possuem fatores genéticos para a resistência à mosca. No Ceará, avaliando-se coleções

de sorgo provenientes de Camarões, na África, e da Universidade de Purdue, Estados Unidos, para resistência a *S. sorghicola*, foi verificado que 20% dos genótipos da primeira coleção foram menos infestados pela mosca, enquanto na segunda coleção apenas 4,6% deles foram pouco danificados (Santos; Carmo, 1974; Santos et al., 1974). Em Caruaru-PE, Faris et al. (1974) constataram que os genótipos IS-2740, IS-9826, NK 300, AF-112, ICAPAL-1 e a variedade 22078-1 de Purdue (IPA 730040) foram resistentes à mosca-do-sorgo. Os genótipos ICAPAL-1 e AF-112 também se revelaram resistentes em Serra Talhada-PE. Avaliando-se o efeito de local e época de plantio sobre a expressão da resistência em AF-28, constatou-se a densidade de 0,8 a 2,9 fêmeas/panícula neste genótipo, enquanto no híbrido R-1090 a densidade variou de 137 a 252 fêmeas/panícula, respectivamente, em Campinas e Jaboticabal, no estado de São Paulo (Lara et al., 1977). Ainda em Jaboticabal, Busoli e Osuma (1982) constataram alta resistência à mosca no genótipo EA-73, em mesmo nível da apresentada por AF-28 (Santos et al., 2005).

O programa mais intensivo de seleção de sorgo para resistência à mosca foi desenvolvido no Texas. Johnson e Teetes (1979) citam uma lista de 21 fontes e 29 linhagens melhoradas com resistência à mosca. Entre as linhagens, está incluída uma série que inicia em Tx 2754 a Tx 2761, com reação B, e outra iniciando em Tx 2762 a Tx 2780, com reação R, sendo a maioria dessas linhagens derivadas da fonte TAM 2566. Com reação restauradora (R), estão incluídas, ainda, a linhagem TX 2781, derivada da fonte IS 2508C (SC 414), e a linhagem ISR 1, derivada da fonte AF-28. Hoje, em vários países, como Estados Unidos e Índia, estão disponíveis no mercado de sementes híbridos de sorgo resistentes à mosca (Santos et al., 2005).

No Brasil, foi selecionada a variedade IAC 83/75-5-1-6 com resistência múltipla moderada a *S. sorghicola* e pássaros Psittacidae (periquitos e maritacas) e boa resistência ao pulgão *S. graminum*, com razoável produtividade em vários locais do estado de São Paulo. Embora essa variedade apresente também resistência ao acamamento, ela mostrou-se suscetível ao míldio e à antracnose (Rossetto et al., 1993).

Pragas de Grãos Armazenados

Outra linha de pesquisa pouco estudada é sobre os níveis de resistência nos híbridos de sorgo para utilização em estratégias de manejo de pragas durante o armazenamento, como a carunchos, gorgulhos e traças. Pimentel et al. (2018), avaliando diferentes genótipos de sorgo, indicaram os híbridos 1167092, A9735R, Buster e Bravo como os menos suscetíveis às perdas provocadas pelo gorgulho *Sitophilus zeamais* (Motschulsky, 1885) (Coleoptera: Curculionidae) em grãos armazenados por um período superior a 70 dias (temperatura média de 23,6 °C e umidade relativa do ar média de 70,8%) (Figura 13). Uma metodologia interessante para avaliação de resistência de grãos armazenados é o índice de suscetibilidade proposta por Pencoe e Martin (1982), utilizando a fórmula: $IS = (SBL * FDA) / (PDL * AGC)$. Onde: IS = índice de suscetibilidade, SBL = sobrevivência larval, FDA = fecundidade dos adultos, PDL = período de desenvolvimento larval (dias) e AGC = área do grão consumido. Este índice quantifica tanto o estágio de adaptação do inseto ao hospedeiro, quanto a sensibilidade do hospedeiro aos danos causados pela praga.

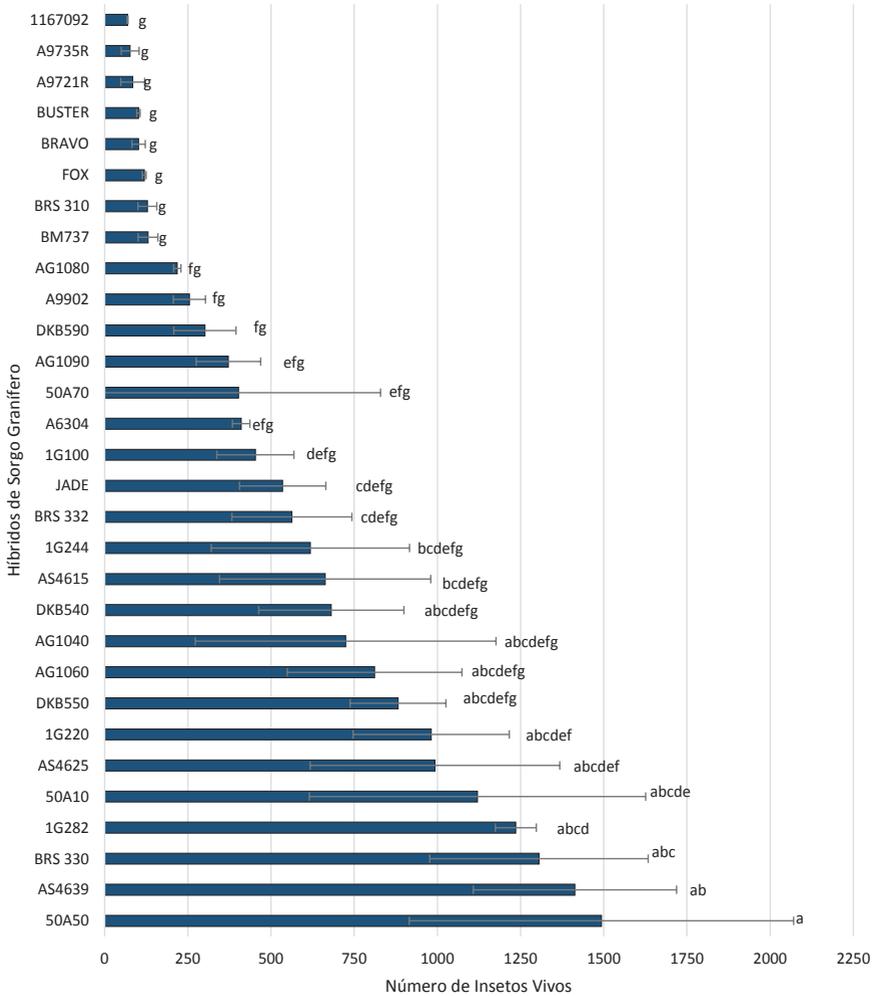


Figura 13. Número de adultos de *Sitophilus zeamais* vivos (\pm EP) em híbridos comerciais de sorgo granífero (Pimentel et al., 2018).

Considerações Finais

Como o ciclo da cultura do sorgo geralmente é muito curto, é recomendado integrar o máximo possível de estratégias de manejo de pragas, intensificando a necessidade de buscar táticas eficientes de manejo, por exemplo, a resistência de plantas (Mendes et al., 2014).

A resistência é específica para aquela espécie-praga. Segundo (Rossetto et al., 1976; Baldin; Bentivenha, 2019), um genótipo pode ser resistente a uma determinada espécie, suscetível ou com resistência moderada a outras. Pode ainda apresentar resultados diferentes dependendo das condições locais como: assincronia fenológica, idade da planta, infestação anterior por outras pragas ou doenças e ainda fatores abióticos com condições atmosféricas, fertilidade do solo, entre outros. Por isso, trabalhar com resistência de plantas como único método de controle é uma tarefa difícil.

Entretanto, há exemplos de grande sucesso, como o caso da Phylloxera na videira e da mosca-do-trigo nos Estados Unidos da América. Dependendo do genótipo e da praga envolvida, essa tática de controle pode ser bastante eficiente. Outro exemplo é o uso de genótipos de sorgo resistentes a *S. graminum*, que reduziu muito a utilização de inseticidas e foi eficaz para o controle (Michaud; Sloderbeck, 2005). Mas, normalmente, obtém-se maior eficiência com o uso de variedades resistentes associadas a outros métodos de controle, em um programa de manejo integrado de pragas. Em razão do tempo em que os principais trabalhos foram realizados com resistência de sorgo, isto é, décadas atrás, e principalmente apenas com sorgo granífero, aliado à falta de trabalhos com sorgo de diferentes categorias, deve-se diante das novas técnicas e perspectivas de pesquisa em resistência de plantas a insetos, juntamente com o crescimento da importância do sorgo no país, realizar mais estudos em programas de melhoramento de sorgo, compatibilizando a maior produtividade e a resistência às principais pragas. Um exemplo desse potencial está na resistência do sorgo ao pulgão-da-cana-de-açúcar, que vem causando perdas elevadas no campo, e existe metodologia bem consolidada para seleção de cultivares resistentes.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e à Embrapa Milho e Sorgo pelo suporte na realização da pesquisa.

Referências

- AGRAMA, H. A.; WILDE, G. E.; REESE, J. C.; CAMPBELL, L. R.; TUINSTRAN, M. R. Genetic mapping of QTLs associated with greenbug resistance and tolerance in *Sorghum bicolor*. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 104, n. 8, p. 1371-1378, 2002.
- ARANDA-LARA, U.; LÓPEZ-BENÍTEZ, A.; ANTONIO FLORES-NAVEDA, A.; ZAMORA-VILLA, V. M.; RODRÍGUEZ-DEL-BOSQUE, L. A.; ROONEY, W. L. Susceptibility of sorghum hybrids to the sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari*, in Central Mexico. **BioOne**, v. 44, n. 3, p. 771-774, 2019.
- ARAÚJO, O. G.; VILELA, M.; SIMEONE, M. L.; SILVEIRA, L. C. P.; FADINI, M. A. M.; PARRELLA, R. A. C.; MENDES, S. M. Resistance of bioenergy sorghum to *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae). **Bioscience Journal**, v. 35, n. 4, p. 1022-1032, 2019.
- ARMSTRONG, J. S.; ROONEY, W. L.; PETERSON, G. C.; VILLENUEVA, R. T.; BREWER, M. J.; SEKULA-ORTIZ, D. Sugarcane aphid (Hemiptera: Aphididae): host range and sorghum resistance including cross-resistance from greenbug sources. **Journal of Economic Entomology**, v. 108, n. 2, p. 576-582, 2015.
- BALDIN, E. L. L.; STAMM, M. D.; BENTIVENHA, J. P. F.; KOCH, K. G.; HENG-MOSS, T. M.; HUNT, T. E. Feeding behavior of *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) on soybeans exhibiting antibiosis, antixenosis, and tolerance resistance. **Bio One**, v. 101, n. 2, p. 223-228, 2018.
- BALDIN, E. L. L.; BENTIVENHA, J. P. F. Fatores que afetam a expressão da resistência. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 323-356.
- BALDIN, E. L. L.; PANNUTI, L. E. R.; BENTIVENHA, J. P. F. Antixenose. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 137-170.

BASTOS, C. S.; RIBEIRO, A. V.; SUINAGA, F. A.; BRITO, S. M.; OLIVEIRA, A. A. S.; BARBOSA, T. M.; SANTOS, P. de J. dos; OLIVEIRA, D. V. V.; TELCHMANN, Y. S. K. Resistência de plantas a insetos: contextualização e inserção no MIP. In: VISOTTO, L. E.; FERNADES, F. L.; CARVALHO FILHO, A.; LOPES, E. A.; AQUINO, L. A. de.; GOD, P. I. V. G.; RUAS, R. A. A.; SOUSA JÚNIOR, J. M. de. (ed.). **Avanços tecnológicos aplicados à pesquisa na produção vegetal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2015. p. 32-72.

BECKER, M. Uma nova espécie de percevejo castanho (Heteróptera:Cydniidae: Scaptocorinae): praga de pastagens do centro-oeste do Brasil. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 25, n. 1, p. 95-102, 1996.

BERNARDI, O.; BERNARDI, D.; RIBEIRO, R. S.; OKUMA, D. M.; SALMERON, E.; FATORETTO, J.; MEDEIROS, F. C. L.; BURD, T.; OMOTO, C. Frequency of resistance to Vip3Aa20 toxin from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. **Crop Protection**, v. 76, p. 7-14, 2015.

BLACKMAN, R. L.; EASTOP, V. F. **Aphids on the world's crops: an identification and information guide**. New York: Wiley, 1984.

BOIÇA JÚNIOR, A. L.; LARA, F. M. Avaliação da resistência de genótipos de *Sorghum bicolor* (L.) Moench a *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794) (Lepidoptera-Pyralidae) e determinação dos tipos envolvidos. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 12, p. 261-272, 1983.

BORTOLI, S. A.; DÓRIA, H. O. S.; ALBERGARIA, N. M. M. S.; BOTTI, M. V. Biological aspects and damage of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in sorghum, under different doses of nitrogen and potassium. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 2, p. 267-273, 2005.

BOWDEN, J.; NEVE, R. A. Sorghum midge and resistant varieties in the Gold Coast. **Nature**, v. 172, p. 4377-4551, 1953.

BUSATO, G. R.; GRUTZMACHER, A. D.; GARCIA, M. S. Biologia comparada de populações de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) em folhas de milho e arroz. **Neotropical Entomology**, v. 34, n. 5, p. 743-750, 2005a.

BUSATO, G. R.; GRUTZMACHER, A. D.; GARCIA, M. S. Exigências térmicas e estimativa do número de gerações dos biótipos ‘milho’ e ‘arroz’ de *Spodoptera frugiperda*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 4, p. 329-335, 2005b.

BUSOLI, A. C.; OSUNA, J. A. Resistência de genótipos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] a *Contarinia sorghicola* (Coquillett, 1898) (Diptera: Cecidomyiidae), sob condições de campo. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 11, n. 2, p. 169-180, 1982.

CARVALHO, R. P. L. **Danos, flutuação da população, controle e comportamento de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) e susceptibilidade de diferentes genótipos de milho, em condições de campo**. 1970. 170 f. Tese (Doutorado em Entomologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1970.

CHANG, C. P.; FANG, M. N.; TSENG, H. Y. Studies on the life history and varietal resistance in grain sorghum aphid, *Melanaphis sacchari* Zehntner in central Taiwan. **Chinese Journal of Entomology**, v. 2, p. 70-81, 1982.

CHUPIN, L.; RIDDER, D. de; CLÉMENT-VIDAL, A.; SOUTIRAS, A.; GINEAU, E.; MOUILLE, G.; ARNOULT, S.; BRANCOURT-HULMEL, M.; LAPIERRE, C.; POT, D.; VINCENT, L.; MIJA, A.; NAVARD, P. Influence of the radial stem composition on the thermal behaviour of miscanthus and sorghum genotypes. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 167, p. 12-19, 2017.

CORREA-FERREIRA, B. S.; SOSA-GOMEZ, D. R. **Percevejos e o sistema de produção soja-milho**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 98 p. (Embrapa Soja. Documentos, 397).

CORTEZ, M. G. R.; WAQUIL, J. M. Influência de cultivar e nível de infestação de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) no rendimento do sorgo. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 26, n. 2, p. 407-410, 1997.

CRUZ, I.; ALVARENGA, C. D.; FIGUEIREDO, P. E. F. Biologia de *Doru luteipes* (Scudder) e sua capacidade predatória de ovos de *Helicoverpa zea* (Boddie). **Anais da sociedade entomológica do Brasil**, v. 24, n. 2, p. 273-278, 1995.

CRUZ, I.; VENDRAMIM, J. D.; OLIVEIRA, A. C. Determinação do Período de Avaliação de não-preferência de sorgo ao pulgão-verde, *Schizaphis graminum* (Rond.) (Homoptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 27, n. 2, p. 299-302, 1998.

DAVIS, F. M.; WILLIAMS, W. P. Methods used to screen maize for resistance and to determine mechanisms of resistance to the Southwestern corn borer and fall armyworm. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON METHODOLOGIES FOR DEVELOPMENT HOST PLANT RESISTANCE TO MAIZE INSECTS. **Toward insect resistance maize for the third world: proceedings...** México: CIMMYT, 1989. p. 101-104.

DEQUECH, S. T. B.; CAMERA, C.; STURZA, V. S.; RIBEIRO, L. P.; QUERINO, R. B.; PONCIO, S. Population fluctuation of *Spodoptera frugiperda* eggs and natural parasitism by *Trichogramma* in maize. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 295-300, 2013.

DOGRAMACI, M.; MAYO, Z. B.; WRIGHT, R. J.; REESE, J. C. Categories of resistance, antibiosis and tolerance, to biotype I greenbug (*Schizaphis graminum* (Rondani) Homoptera: Aphididae) in four sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench. Poales:Gramineae) whybrids. **Journal of the Kansas Entomological society**, v. 80, n. 3, p. 183-191, 2007.

EASTOP, V. F. Notes on east African aphids. VI. Cereal and grass root feeding species. **East African Agricultural Journal**, v. 20, n. 2, p. 209-212, 1954.

EHRlich, P. R.; RAVEN, P. H. Butterflies and plants: a study in coevolution, **Evolution**, v. 18, n. 4, p. 586-608, 1964.

ERB, M. Plant defenses against herbivory: closing the fitness gap. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 3, p. 187-194, 2018.

FARIS, M. A.; VENTURA, C. A.; FERRAZ, L. 1. Competição de híbridos graníferos e forrageiros. 2. Competição de variedades graníferas. 3. Competição de cultivares internacionais de Purdue. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 10, Sete Lagoas, 1974. **Anais...** Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 1974. p. 157-176.

GATEHOUSE, J. A. Plant resistance towards insect herbivores: a dynamic interaction. **New Phytologist**, v. 156, p. 145-169, 2002.

GONÇALVES, A. L.; NAZARET, A. M. P.; LEITE, N. A.; SANTOS, C. A.; ARAÚJO, O. G.; MENDES, S. M. Adaptação de *Spodoptera frugiperda* O. E Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) em diferentes genótipos de sorgo sacarino. In: SIMPÓSIO DE ENTOMOLOGIA, 3., 2011, Viçosa, MG. **Resumos...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2011.

HARRIS, M. K. Allopatric resistance: Searching for sources of insect resistance for use in agriculture. **Environmental Entomology**, v. 4, p. 661-669, 1975.

HILL, C. B.; KIM, K.; CRULL, L.; DIERS, B. W.; HARTMAN, G. L. Inheritance of resistance to the soybean aphid in soybean PI 200538. **Crop Science**, v. 49, n. 4, p. 1193-1200, 2009.

HOFFMANN-CAMPO, C. B.; GRAÇA, J. P. O papel dos metabólitos secundários na resistência de plantas a insetos. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 99-126.

HSIEH, J.; PI, C. P. Genetic study on aphid resistance in sorghum. **Journal Agricultural Association of China**, v. 117, p. 6-14, 1982.

JOHNSON, J. W.; TEETES, G. L. Breeding for arthropod resistance in sorghum. In: HARRIS, M. K. **Biology and breeding for resistance to arthropods and pathogens in agricultural plants**. College Station: Texas Agricultural Experiment Station, 1979.

KOCH, K. G.; DONZE-REINER, T.; HUNT, T. E.; HENG-MOSS, T. M.; BALDIN, E. L. L. Tolerância. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 225-246.

KNOLHOFF, L. M.; HECKEL, D. G. Behavioral assays for studies of host plant choice and adaptation in herbivorous insects. **Annual Review of Entomology**, v. 59, p. 263-278, 2013.

KOGAN, M. Plant resistance in pest management. In: METCALF, R. L.; LUCKMANN, W. H. (ed.). **Introduction to insect pest management**. New York: John Wiley & Sons, 1975. p. 103-146.

KOGAN, M.; ORTMAN, E. E. Antixenosis- a new term proposed to replace Painter's "nonpreference" modality of resistance. **Bulletin of Entomological Society of America**, v. 24, p. 175-176, 1978.

KRIMMEL, B.; PEARSE, I. S. Tolerance and phenological avoidance of herbivory in tarweed species. **Ecology**, v. 97, p. 1357-1363, 2016.

LARA, F. M.; BARBOSA, F. G. G.; BUSOLI, A. C.; BARBOSA, J. C. Comportamento de genótipos de sorgo em relação ao ataque de *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina, v. 8, p. 125-130, 1979.

LARA, F. M.; FOSS, M. R. D. A.; BOIÇA JÚNIOR, A. L.; TRIGO, J. G. Resistência de genótipos de sorgo a *Contarinia sorghicola* (Coq.) (Diptera: Cecidomyiidae) e *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Pyralidae) e influência sobre parasitoides. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 26, n. 2, p. 327-333, 1997.

LARA, F. M. **Princípios de resistência de plantas a insetos**. São Paulo: Ícone, 1991. 336 p.

LARA, F. M.; PERUSSI, E. M. Resistência de sorgo sacarino *Sorghum bicolor* (L.) Moench ao ataque de *Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794). **Ciência e Cultura**, v. 36, p. 280-286, 1984.

LARA, F. M.; ROSSETTO, C. J.; IGUE, T. Resistance of the AF-28 sorghum variety to sorghum midge. **Entomologia and Experimentalis et Applicata**, v. 21, p. 238-242, 1977.

LÓPEZ, J.; PITRE, H. N.; MECKENSTOCK, D. H. Influence of nitrogen fertilizer on resistance to fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) in tropical Honduran landrace sorghum. **Ceiba**, v. 41, n. 1, p. 35-39, 2000.

LUCENA, A. I. T. **Comportamento de genótipos de sorgo granífero em relação a *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera, Noctuidae) e tipos de resistência envolvidos.** 1978. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1978.

MANTHE, C. S. **Sorghum resistance to sugarcane aphid (Homoptera: Aphididae).** 1992. 116 p. Tese (Doutorado) - Texas A&M University, College Station, 1992.

MCMILLIAN, W. W.; STARKS, K. J. Greenhouse and laboratory screening of sorghum lines for resistance to fall armyworm larvae. **Journal of Economic Entomology**, v. 60, p. 1462-1463, 1967.

MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SAMPAIO, M. V.; VIANA, P. A. Manejo de pragas na cultura do sorgo. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 278, p. 89-99, 2014.

MICHAUD, J. P.; SLODERBECK, P. E. **Russian wheat aphid: an introduced pest of small grains in the high plains.** Manhattan: Kansas State University, 2005. 4 p. Disponível em: <<http://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF2666.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

MITCHELL, C.; BRENNAN, R. M.; GRAHAM, J.; KARLEY, A. J. Plant defense against herbivorous pests: exploiting resistance and tolerance traits for sustainable. Crop Protection. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, article 1132, 2016.

NAGARAJ, N.; REESE, J. C.; TUINSTRA, M. R.; SMITH, C. M.; AMAND, P. S.; KIRKHAM, M. B.; KOFOID, K. D.; CAMPBELL, L. R.; WILDE, G. E. Molecular mapping of sorghum genes expressing tolerance to damage by greenbug (Homoptera: Aphididae). **Journal of Economic Entomology**, v. 98, p. 595-602, 2005.

NAGOSHI, R. N.; MEAGHER, R. L. Review of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) genetic complexity and migration. **Florida Entomologist**, v. 91, n. 4, p. 546-554, 2008.

PAINTER, R. H. **Insect resistance in crop plants.** New York: McMillan, 1951.

PAUDYAL, S.; ARMSTRONG, J. S.; GILES, K. L.; PAYTON, M. E.; OPIT, G. P.; LIMAJE, A. Categories of resistance to sugarcane aphid (Hemiptera: Aphididae) among sorghum genotypes. **Journal of Economic Entomology**, v. 112, n. 4, p. 1932-1940, 2019.

PERALES-ROSAS, D.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, V.; ANDRADE-RODRÍGUEZ, M.; ALIA-TEJACAL, I. Evaluación de la antibiosis, antixenosis, y tolerancia de *Melanaphis sacchari/sorghii* en híbridos de sorgo. **Bio One**, v. 44, n. 3, p. 763-769, 2019.

PETERSON, R. K. D.; HIGLEY, L. G. Illuminating the black box: the relationship between injury and yield. In: PETERSON, R. K. D.; HIGLEY, L. G. (ed.). **Biotic stress and yield loss**. New York: CRC Press, 2001. p. 1-12.

PETERSON, R. K. D.; VARELLA, A. C.; HIGLEY, L. G. Tolerance: the forgotten child of plant resistance. **PeerJ**, v. 5, e3934, 2017.

PIMENTEL, M. A. G.; MENDES, S. M.; MENEZES, C. B.; OLIVEIRA, I. R.; RAMOS, G. C. P.; FERNANDES, D. K. S. **Escolher o híbrido certo ajuda a controlar o caruncho nos grãos de sorgo?** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 22 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 172).

PENCOE, N. L.; MARTIN, P. B. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larval development and adult fecundity on five grass hosts. **Environmental Entomology**, v. 11, p. 720-724, 1982.

REESE, J. C. Insect dietetics: complexities of plant-insect interactions. In: BHASKARAN, G.; FRIEDMAN, S.; RODRIGUEZ, J. G. (ed.). **Current topics in insects endocrinology and nutrition**. New York: Plenum, 1981. p. 317-335.

ROSSETTO, C. J. **Resistência de plantas a insetos**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1973. 171 p.

ROSSETTO, C. J.; BANZATTO, N. V.; GALLO, P. B.; BORTOLETTO, N.; RIBEIRO, I. J. A.; RAZERA, L. F.; IGUE, T. Melhoramento de sorgo para multiresistência: II. Obtenção de variedade resistente a *Contarinia sorghicola*, *Psittacidae* e *Schizaphis graminum*. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 14, 1993, Piracicaba. **Resumos**. Piracicaba: Sociedade Entomológica do Brasil, 1993. p. 395.

ROSSETTO, C. J.; BANZATTO, N. V.; IGUE, T. Comportamento de variedades de sorgo em relação a *Contarinia sorghicola* e *Rhopalosiphum maidis* em diferentes épocas de plantio. **Bragantia**, v. 35, p. 365-374, 1976.

ROSSETTO, C. J.; BANZATTO, N. V. Resistência de variedades de sorgo a *Contarinia sorghicola* (Coquillett) (Diptera: Cecidomyiidae). In: REUNIÃO LATINOAMERICANA DE FITOTECNIA, 7, 1967, Maracay. **Resumos...** Maracay: [s.n.], 1967. p. 292-293.

SCHOONHOVEN, L. M.; VAN LOON, J. J. A.; DICKE, M. (ed.). **Insect-plant biology**. Oxford: University Press, 2005. 440 p.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento do sorgo. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 605-658.

SANTOS, J. H. R.; CARMO, C. M. Evaluation of resistance to *Contarinia sorghicola* of sorghum lines from Camerron. **Sorghum Newsletter**, v. 17, p. 10-11, 1974.

SANTOS, J. H. R. dos; CARMO, C. M.; LIMA, F. C. B. Evaluation of resistance to *Contarinia sorghicola* by sorghum lines from the Purdue collection, in Ceará, Brazil. **Sorghum Newsletter**, v. 17, p. 12-13, 1974.

SANTOS, L. A. O.; MIHSFELDT, L. H. Capacidade de busca e de parasitismo de *Cotesia flavipes* Cameron (Hymenoptera: Braconidae) em lagartas de *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae). **EntomoBrasilis**, v. 7, n. 2, p. 106-109, 2014.

SANTOS, L. M.; REDAELLI, L. R.; DIEFENBACH, L. M. G.; EFROM, C. f. S. Fertilidade e longevidade de *Spodoptera frugiperda* (J.E.Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) em genótipos de milho. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 345-350, 2004.

SANTOS, T. M.; WAQUIL, J. M.; ANDRADE, R. V. Avaliação do germoplasma de sorgo para resistência à *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae). In: EMBRAPA. Centro de

Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1988-1991**. Sete Lagoas, 1992 p. 98-100.

SILVA, D. D.; COTA, L. V.; COSTA, R. V. da; PARREIRA, D. F. Principais doenças do sorgo. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 278, p. 102-111, 2014.

SILVA, F. A. C.; PANIZZI, A. R. Interações inseto-planta. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 65-89.

SILVA, T. I.; SANTANA, L. D.; CAMARA, F. T.; PINTO, A. A.; BRITO, L. L. M.; MOTA, A. M. D. Produtividade de variedades de sorgo em diferentes arranjos populacionais em primeiro corte e rebrota. **Revista Espacios**, v. 38, n. 27, p. 16-27, 2017.

SINGH, B. U.; PADMAJA, P. G.; SEETHARAMA, N. Biology and management of the sugarcane aphid, *Melanaphis sacchari* (Zehntner) (Homoptera: Aphididae), in sorghum: a review. **Crop Protection**, v. 23, p. 739-755, 2004.

SMITH, C. M. **Plant resistance to arthropods: molecular and conventional approaches**. Berlin: Springer, 2005. 421 p.

SPEROTTO, R. A.; BUFFON, G.; SCHWAMBACH, J.; RICACHENEVSKY, F. K. Crops responses to mite infestation: It's time to look at plant tolerance to meet the farmers' needs. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, article 556, 2018.

STARK, K. J.; BURTON, R. L. **Greenbugs: determining biotypes, culturing, and screening for plant resistance**. Washington: United States Department of Agriculture, 1977. 17 p. (Technical Bulletin, n. 1556).

STENBERG, J. A.; MUOLA, A. How should plant resistance to herbivores be measured? **Frontiers in Plant Science**, v. 8, article 663, 2017.

STOUT, M. J. Reevaluating the conceptual framework for applied research on host-plant resistance. **Insect Science**, v. 20, n. 3, p. 263-272, 2013.

STOWE, K. A.; MARQUIS, R. J.; HOCHWENDER, C. G.; SIMMS, E. L. The evolutionary ecology of tolerance to consumer damage. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 31, n. 1, p. 565-595, 2000.

TAN, W. Q.; LI, S. M.; GUO, H. P.; GAO, R. P. A study of the inheritance of aphid resistance in sorghum. **Shanxi Agricultural Science**, v. 8, p. 12-14, 1985.

TRUMBLE, J. T.; KOLODNY-HIRSCH, D. M.; TING, I. P. Plant compensation for arthropod herbivory. **Annual Review of Entomology**, v. 38, p. 93-119, 1993.

VAN RENSBURG, N. J. Notes on the occurrence and biology of the sorghum aphid in South Africa. **Journal of the Entomological Society of Southern Africa**, v. 36, p. 293-298, 1973.

VENDRAMIM, J. D.; GUZZO, E. C.; RIBEIRO, L. P. Antibiose. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 185-214.

VIANA, P. A.; RODRIGUES, J. A. S.; MENDES, S. M. Resistência genética de linhagens de sorgo à *Elasmopalpus lignosellus*. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., Águas de Lindóia, 2012. **Anais...** Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2012. p. 1026-1030.

VILELA, M.; SANTOS, A. J. N.; SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, A. C.; SILVA, D. D.; PARREIRA, D. F.; OKUMURA, F.; SCHAFFERT, R. E.; MENDES, S. M. Influence of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) infestation on sweet sorghum productivity and juice quality. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 39, p. 2877-2885, 2017.

WAQUIL, J. M.; LOPES, J. R. S.; MARTINS, J. F. S.; VIANA, P. A.; MALUTA, N. K. P. Técnicas para avaliação de resistência. In: BALDIN, E. L. L.; VENDRAMIM, J. D. LOURENÇÃO, A. L. (ed.). **Resistência de plantas a insetos: fundamentos e aplicações**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 255-313.

WAQUIL, J.; OLIVEIRA, L. J. **Percevejo barriga-verde**: nova prioridade das culturas em sucessão à soja. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

WAQUIL, J. M.; RODRIGUES, J. A. S.; SANTOS, F. G.; FERREIRA, A. S.; VILELLA, F. M. F.; FOSTER, J. E. Resistance of commercial hybrids and lines of sorghum, *Sorghum bicolor* (L.) Moench., to *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Pyralidae). **Neotropical Entomology**, v. 30, n. 4, p. 661-668, 2001.

WAQUIL, J. M.; SANTOS, T. M. Avaliação de cultivares de sorgo em relação à lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda*. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 18., 1990, Vitória. **Resumos**. Vitoria: EMCAPA/EMBRAPA, 1990. p. 88.

WAQUIL, J. M.; SANTOS, J. P.; LORDELO A. I. L.; SCHAFFERT R. E.; SANTOS, F. G.; VENCOVSKY, R.; OLIVEIRA, A. C. Comportamento de cultivares de sorgo sacarino em relação à broca-da-cana-de-açúcar, *Diatraea saccharalis* (F. 1794) em condições de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 6., 1980, Campinas. **Resumos...** Campinas: SEB/CATI, 1980. p. 151.

WAQUIL, J. M.; TEETES, G. L.; PETERSON, G. C. *Sorghum midge* (Diptera: Cecidomyiidae) adult ovipositional behavior on resistance and susceptible sorghum hybrids. **Journal of Economic Entomology**, v. 79, p. 330-332, 1986.

WAQUIL, J. M.; VIANA, P. A.; CRUZ, I. **Manejo de pragas na cultura do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003.25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 27).

WAQUIL, J. M.; VIANA, P. A.; CRUZ, I.; SANTOS, J. P.; J. RODRIGUES, A. S. Avaliação das cultivares de sorgo granífero incluídas no Ensaio Nacional (97/98) para resistência a *Elasmopalpus lignosellus* (Zeller) e *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998, Recife. **Globalização e segurança alimentar**: anais. Recife: IPA, 1998.

WHITTAKER, R. H.; FEENY, P. P. Allelochemicals: chemical interactions between species. **Science**, v. 171, n. 3973, p. 757-770, 1971.

WISEMAN, B. R.; MCMILLIAN, W. W. Resistance in sorghum to sorghum midge, *Contarinia sorghicola* (Coquillet) (Diptera:Cecidomyiidae). **Journal of the Entomological Society of Georgia**, v. 3, p. 147-153, 1968.

WISEMAN, B. R.; MCMILLIAN, W. W.; WIDSTROM, N. W. Registration of SGIRI-MR-1 Sorghum germoplasm. **Crop Science**, v. 13, n. 1, p. 398, 1973.

WU, Y.; HUANG, Y. Molecular mapping of QTLs for resistance to the greenbug *Schizaphis graminum* (Rondani) in *Sorghum bicolor* (Moench). **Theoretical and Applied Genetics**, v. 117, n. 1, p. 117-124, 2008.

Literatura Recomendada

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROFIT**: sistema de agrotóxicos fitossanitários. Brasília, DF, c2003. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 23 mar. 2020.

HEIL, M. Herbivore-induced plant volatiles: targets, perception and unanswered questions. **New Phytologist**, v. 204, p. 297-306, 2014.

ROSSETTO, C. J.; IGUE, T. Herança da resistência da variedade de sorgo AF-28 a *Contarinia sorghicola* Coquillet. **Bragantia**, v. 42, n. 19, p. 211-219, 1983.

ROZA-GOMES, M. F.; SALVADORI, J. R.; PEREIRA, P. R. V. S.; PANIZZI, A. R. Injúrias de quatro espécies de percevejos pentatomídeos em plântulas de milho. **Ciência Rural**, v. 41, n. 7, p. 1-5, 2011.

Capítulo 15

Tolerância ao alumínio e eficiência na absorção de fósforo em sorgo

*Karla Jorge da Silva
Sylvia Moraes de Sousa
Jurandir Vieira Magalhães
Crislene Vieira dos Santos
Cicero Beserra de Menezes*

Tolerância ao Alumínio em Sorgo

A toxidez causada pelo alumínio (Al) é fator limitante para a produção de grãos e biomassa de sorgo, sendo este estresse comum nos solos do bioma Cerrado. Nessa região predominam os Latossolos, caracteristicamente ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC), baixa disponibilidade de fósforo (P) e toxidez causada pelo Al, que reduz a absorção de água e de nutrientes, comprometendo o crescimento da planta (Ferreira et al., 2006).

O uso de metodologias modernas de manejo de solo tem proporcionado avanços no cultivo do sorgo nessas regiões. Além disso, estudos fisiológicos e genômicos têm permitido a identificação de genes e mecanismos de tolerância à toxidez causada pelo Al, e maior eficiência na utilização de fósforo (P) (Barros et al., 2020).

O dano radicular é a principal consequência da toxidez de Al, afetando o alongamento e a divisão celular, diminuindo a capacidade da planta de absorver água e nutrientes do subsolo, tornando-a, menos produtiva e mais suscetível à seca. A redução do crescimento radicular por Al é provocado pela atividade fitotóxica das suas formas iônicas em células do ápice radicular, a partir do comprometimento de estruturas citoesqueléticas, de processos de alongamento celular, da homeostase de cálcio e da formação de espécies reativas de oxigênio (Kochian et al., 1995).

Para impedir esse efeito fitotóxico do Al no solo, usa-se a incorporação profunda de corretivos e de fertilizantes, por exemplo, a aplicação de calcário para elevar o pH do solo e, assim, reduzir ou eliminar a toxidez causada pelo Al. Com o aumento do pH, o Al^{3+} precipita-se, formando $Al(OH)_3$,

composto que não é tóxico às raízes das plantas, sendo esta a base química da neutralização do efeito fitotóxico do Al^{3+} pela prática da calagem (Echart; Cavalli-Molina, 2001). Porém, essa opção é dispendiosa e muitas vezes impraticável, pela dificuldade e pelo alto custo associado à neutralização do Al em camadas mais profundas do solo.

A alternativa mais promissora para mitigar os efeitos da toxidez causada pelo Al é a exploração da variabilidade genética das plantas. A adaptação do sorgo a condições adversas busca a seleção de genótipos tolerantes ao Al, para permitir seu cultivo em solos ácidos.

Melhoramento para a Tolerância ao Alumínio

A tolerância ao Al está presente em uma frequência de aproximadamente 5% em sorgo (Caniato et al., 2011). Portanto, em etapas de pré-melhoramento, visando à obtenção de genótipos tolerantes ao Al, é preciso a fenotipagem de um grande número de acessos (Prada, 2009; Magalhães et al., 2011).

Algumas linhagens são classificadas como altamente tolerantes ao Al, como as linhagens SC283 e SC566, que são fontes preferenciais de tolerância ao Al em sorgo, sendo a tolerância ao Al condicionada pelo loco *Alt_{SB}* (Caniato et al., 2007, 2011).

Estudos realizados na Embrapa Milho e Sorgo caracterizaram uma população multiparental de recombinação ao acaso de sorgo para seleção de progênies tolerantes ao Al e eficientes na utilização de P. Para esse fim, uma população de recombinação ao acaso de sorgo (BRP13R) foi constituída com o uso de macho-esterilidade genética, e genotipada com marcadores gene-específicos para os genes *SbMATE* e *SbPSTOL1*. Esses estudos mostraram como populações multiparentais são eficientes para clonagem de genes de efeito maior, como o gene *SbMATE*, que codifica um transportador de citrato-ativado por Al. Essas diferentes abordagens beneficiam o desenvolvimento de cultivares que acumulem alelos favoráveis em diferentes locos de tolerância a estresses abióticos, que são importantes para conferir adaptação ampla do sorgo a solos ácidos (Bernardino et al., 2020).

Fenotipagem de Sorgo para Tolerância ao Alumínio em Cultivo Hidropônico

A tolerância ao Al é avaliada pelo crescimento radicular em solução nutritiva contendo Al (Magnavaca et al., 1987; Magalhães et al., 2004; Magalhães; Guimarães, 2008). Quanto maior o crescimento radicular na presença de Al, maior é a tolerância. Da mesma forma, genótipos altamente sensíveis ao Al sofrem redução drástica do crescimento radicular (Figura 1).



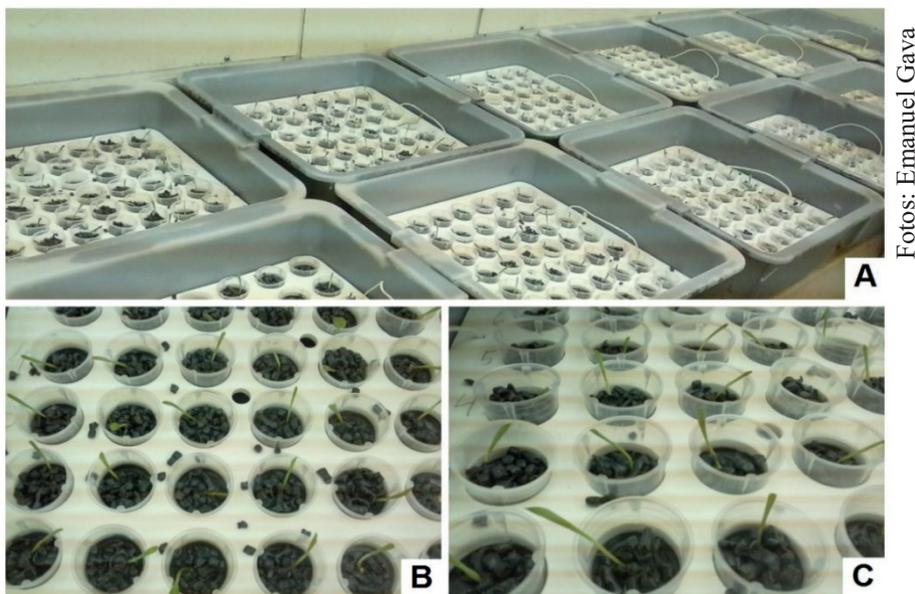
Foto: Elizete Carvalho.

Figura 1. Fenótipo radicular de plântulas submetidas à toxidez de Al em solução nutritiva. Esquerda (tolerantes) e direita (suscetíveis).

A solução nutritiva de acordo com Magnavaca et al. (1987) contém os seguintes macronutrientes: (mmol L^{-1}): Ca -3,53; K - 2,35; Mg - 0,85; N (NO_3) - 10,86; N(NH_4) - 1,3; P - 0,045; S - 0,59; e dos micronutrientes ($\mu\text{mol L}^{-1}$): B - 25; Mn - 9,1; Cu- 0,63; Mo - 0,83; Zn - 2,29; FeHEDTA - 77; e Cl-

600. O Al é adicionado como $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ e o pH ajustado para 4.0. A atividade de Al livre utilizada é de $27 \mu M Al^{3+}$. A metodologia completa pode ser encontrada em Caniato et al. (2007).

Inicialmente, as sementes de sorgo são esterilizadas com 0,525% NaOCl por 10 minutos sob agitação, seguindo-se lavagem final por 8 vezes com água ultrapura. As sementes são colocadas para germinar em papel Germitest umedecido em água destilada, permanecendo em câmara de crescimento BOD (temperatura diurna de $21 \text{ }^\circ C$, temperatura média noturna de $27 \text{ }^\circ C$). Após quatro dias, as plântulas são transferidas para bandejas plásticas de 8L contendo solução nutritiva controle (sem Al) (Figura 2). As plântulas permanecem por 24 horas em solução controle para aclimação, com posterior transferência para solução contendo Al na atividade desejada (tratamento com Al) e nova solução sem Al (tratamento controle).



Fotos: Emanuel Gava

Figura 2. Transplântio de plântulas de sorgo para o meio de solução nutritiva (A) e ilustração do substrato (B e C).

O comprimento inicial da raiz seminal é medido antes do início dos tratamentos, seguindo-se novas medições após três e cinco dias (Figura 3). Valores percentuais de inibição de crescimento radicular são estimados pela razão entre o crescimento radicular líquido (CRL, definido como comprimento final - comprimento inicial) sob tratamento de Al e o CRL na ausência de Al

para os períodos experimentais de três e cinco dias (Magalhães; Guimarães, 2008).

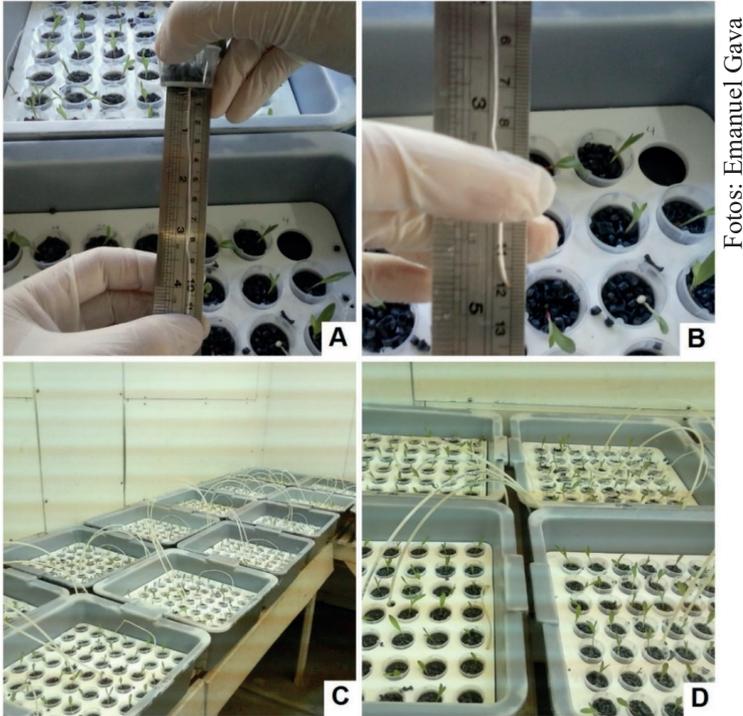


Figura 3. Medição do comprimento das raízes (A e B) e plântulas mantidas na câmara de crescimento (C e D).

Fenotipagem de Sorgo em Solos com Alta Saturação de Alumínio

A Embrapa possui um sítio de fenotipagem (Figura 4) com três níveis de saturação de Al (2,1%, 20,8% e 56%). Para obtenção deste sítio, nas faixas de baixa saturação de alumínio, foi aplicado calcário dolomítico contendo 33% de CaO e 10% de MgO e incorporado na camada de solo de 0-20 cm para alcançar baixa saturação de Al. Na faixa de 50% de saturação, não foi aplicado calcário. Para análise de solo da área, dois meses após a calagem, a área foi dividida em faixas retangulares de 10x10 m, na área controle, e 5x5 m na área com Al. Amostra de solo (0-20 cm) e subsolo (20-40 cm) foram coletadas para análises de fertilidade do solo (Menezes et al.,

2014; Carvalho Júnior et al., 2015). Os valores percentuais de saturação de Al foram calculados como a proporção de Al^{3+} trocável dividido pela soma de cátions básicos mais Al^{+3} .

Menezes et al. (2014) avaliaram 165 híbridos de sorgo neste sítio de fenotipagem, e observaram que a produtividade de grãos reduziu 14,5% e 29,5% nas faixas de 20,8% e 56% de saturação de alumínio, respectivamente, quando comparados com a faixa de baixa saturação.

Carvalho Júnior et al. (2015), avaliando linhagens, mostraram que, sob estresse de Al, ocorreu redução de aproximadamente 50% do rendimento de grãos para BR 007 (linhagem sensível ao Al) em relação à condição controle (2% de saturação de Al), enquanto a linhagem SC283 (tolerante ao Al) foi capaz de manter a produção sob estresse de Al.

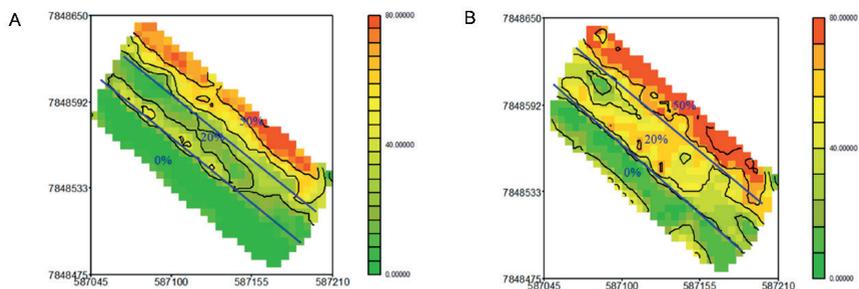


Figura 4. Fenotipagem de campo. Imagens de satélite para saturação de Al (%) camadas do solo (0-20 cm) (A) e (20-40 cm) (B). Eixos x e y correspondem às coordenadas espaciais em Mercador Transversal Universal (UTM). Adaptado de Menezes et al. (2014).

Genes que Conferem Tolerância ao Alumínio em Sorgo

Os primeiros genes clonados, relacionados à tolerância ao Al, codificam transportadores de ácidos orgânicos de duas importantes famílias multigênicas: transportadores de citrato - MATE (*Multidrug and Toxic Compound Extrusion*) e transportadores de malato - ALMT (*Aluminum-Activated Malate Transporter*) (Sasaki et al., 2004; Magalhães et al., 2007).

O primeiro gene relacionado à tolerância ao Al em sorgo é o gene *SbMATE* (Magalhães et al., 2007). A tolerância ao Al em sorgo foi pesquisada em uma população $F_{2:3}$ oriunda do cruzamento das linhagens de sorgo SC283 (tolerante) e BR 007 (sensível). Os resultados encontrados

foram consistentes com a presença de um gene de tolerância ao Al de efeito maior, que responde por aproximadamente 80% da variação fenotípica para a característica (Magalhães et al., 2004; Magalhães; Guimarães, 2008). O gene *SbMATE* foi isolado a partir de clonagem posicional no loco *Alt_{SB}* no cromossomo 3 de sorgo, que é responsável pela maior parte do fenótipo de tolerância ao Al (Magalhães et al., 2004, 2007).

O gene *SbMATE* possui uma expressão superior no ápice radicular de genótipos tolerantes, sendo ela induzida na presença de Al tóxico. Assim, o gene confere tolerância ao Al em sorgo por meio da liberação de citrato para a rizosfera das plantas tolerantes. O citrato forma um complexo estável com os íons Al, que não é tóxico para as raízes das plantas.

A partir de um estudo que considerou um painel com 47 acessos de sorgo de diferentes origens geográficas, a tolerância ao Al foi encontrada em linhagens como SC283, SC566, CMS225 e SC175 (Caniato et al., 2007). Estudos como este indicam que há variação alélica no loco *Alt_{SB}* relacionada à diversidade fenotípica para tolerância ao Al nestes diferentes acessos.

A adaptação do sorgo a solos tropicais depende da tolerância a múltiplos estresses abióticos. Portanto, o uso de populações multiparentais que são passíveis de detecção simultânea de alelos favoráveis de tolerância é necessário. A população BRP13R é comumente usada em esquemas de seleção recorrente em pré-melhoramento, em mapeamento de QTL e seleção genômica, com o objetivo de estreitar a lacuna entre a descoberta do gene e aplicações no desenvolvimento de cultivares (Bernardino et al., 2019, 2020).

Desde a identificação de fatores de transcrição para tolerância ao Al em *Arabidopsis* (STOP1) e em arroz (ART1) (Luchi et al., 2007; Yamaji et al., 2009), homólogos desses genes foram relatados em diferentes espécies, como SbSTOP1 em sorgo sacarino (*Sorghum bicolor*). Recentemente, foram identificados dois fatores de transcrição, *SbWRKY1* e *SbZNF1*, que se ligam ao promotor do gene *SbMATE*, regulando o gene de tolerância ao Al (Melo et al., 2019). Estas pesquisas fornecem uma estratégia potencial para melhorar a tolerância da planta ao Al em solos ácidos por meio do melhor entendimento das interações *cis-trans*.

Eficiência na Absorção de Fósforo

A baixa disponibilidade de fósforo (P) no solo é um dos estresses abióticos que mais causam limitações na produção de diversas culturas, dentre elas o sorgo (López-Arredondo et al., 2014). O P é o segundo macronutriente

que mais limita a produção agrícola, depois do nitrogênio, influenciando a produção de sorgo em países tropicais, como o Brasil (Novais; Smyth, 1999).

A baixa concentração de P disponível às plantas é frequentemente observada em solos altamente intemperizados e ácidos. Este fato pode ser atribuído à adsorção de fosfato, a forma na qual o P é assimilado pelas plantas, por minerais como óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) nos solos argilosos tropicais (López-Arredondo et al., 2014). Os níveis de P também são baixos nos solos muito arenosos por causa da baixa capacidade de adsorção do nutriente que, conseqüentemente, fica suscetível à lixiviação. A fração inorgânica de fosfato mais abundante nos solos tropicais é o fosfato de ferro (Fe-P), seguido pelo fosfato de alumínio (Al-P) e fosfato de cálcio (Ca-P), que são formas pouco disponíveis para as plantas (Rheinheimer et al., 2008). Cerca de 80% do P total em áreas agrícolas de plantio direto estabelecido ou rotação estão na forma orgânica, entretanto, esta forma de P também não é diretamente acessível às plantas.

Deve-se destacar que, assim como existem mecanismos que auxiliam na aquisição do P, também há mecanismos relacionados à eficiência de utilização interna, tais como transporte (passagem do P pela endoderme, liberação no xilema e controle da distribuição por toda a planta); remobilização (translocação de P de regiões em senescência para partes embrionárias de crescimento vegetativo e reprodutivo); distribuição (condução do nutriente para compartimentos, como os vacúolos); metabolismo (manutenção do metabolismo mesmo em condições não ideais do nutriente) e alocação (manutenção do P, em baixas concentrações, em estruturas que funcionam como suporte físico, como colmos ou caules) (Parentoni et al., 2011). Após absorvido, o P é transformado e armazenado em diferentes formas, sendo que nas plantas os principais compostos são os açúcares fosforilados, o fosfato inorgânico, os fosfolípidios, os ácidos (Suh; Yee, 2011).

Sob estresse de P, as plantas acumulam açúcares e amido nas folhas (Ciereszko et al., 2001). O aumento de sacarose no floema sob estresse de fósforo não funciona somente como realocação de carbono para a raiz, o que aumenta o seu tamanho em relação à parte aérea, como também pode iniciar uma cascata de sinalização que altera a expressão de genes que envolvem a otimização da bioquímica da raiz para adquirir P do solo por meio do aumento da expressão e atividade de transportadores de fosfato inorgânico, secreção de fosfatase ácida e ácidos orgânicos para a liberação de P do solo.

Genótipos ineficientes crescidos sob baixo P apresentam redução

da taxa de desenvolvimento da parte aérea, retardamento do início do florescimento, diminuição do número de flores e senescência prematura das folhas, o que leva à redução da produtividade (Marschner, 1995). Os sintomas visuais são observados pela coloração arroxeada das folhas mais velhas, em razão do acúmulo do pigmento antocianina, que evoluem nos estágios tardios para a cor roxo-amarronzada e necrose (Pinto et al., 2006) (Figura 5).



Figura 5. Sintomas de deficiência de P em sorgo.

Fonte: Antônio M. Coelho et al. (2012)

O entendimento de como as plantas respondem à falta de P deverá facilitar a seleção, para aumentar a produção de grãos e reduzir o uso de fertilizantes não renováveis (Jain et al., 2007). Para o avanço da cultura do sorgo, principalmente em solos com deficiência ao P, são necessárias técnicas corretas de manejo de solo e de práticas de melhoramento de plantas.

Modificações na configuração espacial do sistema radicular são particularmente importantes para a eficiência na aquisição de P em plantas, em razão da baixa mobilidade do P no solo (Zhu et al., 2005). Como estratégia para aumentar a aquisição de P, as plantas eficientes tendem a ter maior relação de massa seca da raiz e da parte aérea, e maior comprimento de raiz, além de raízes mais finas, obtendo assim uma maior área superficial do sistema radicular (Marschner, 1995; Zhu et al., 2005).

Como resposta adaptativa, a arquitetura do sistema radicular alterada

aumenta a aquisição de P com um custo metabólico mínimo (Lynch; Brown, 2008). Estudos de genética quantitativa requerem protocolos de fenotipagem rápidos, precisos e robustos. A arquitetura radicular é difícil de ser avaliada diretamente no solo (Trachsel et al., 2011). Já foram relatados diversos procedimentos para se medir raiz em alta escala, porém eles se limitam a condições artificiais, e as plantas podem ser cultivadas apenas por um período limitado de tempo.

Rolos de papel de germinação foram utilizados para investigar a base genética da raiz lateral (Zhu et al., 2005), raiz seminal (Zhu; Lynch, 2004) e pelos radiculares (Zhu et al., 2005) em resposta à disponibilidade de P. Além disso, a Embrapa Milho e Sorgo vem trabalhando com uma metodologia em pasta para avaliar o sistema radicular em baixo P (Sousa et al., 2012).

Em fases posteriores de crescimento, potes podem ser usados para mimetizar condições mais naturais. Por exemplo, Liao et al. (2001) investigaram a resposta gravitrópica de ângulos de raiz em resposta à disponibilidade de P em potes. Embora os experimentos em pote sejam mais representativos do que os ensaios em solução nutritiva, o crescimento das plantas pode ser limitado pelo volume do solo e pela disponibilidade de nutrientes. As raízes já foram medidas após as plantas atingirem a maturidade fisiológica em campo (Kato et al., 2006), em caixas com solo (Araki et al., 2000) e em colunas com solo (Zhu et al., 2010).

O cultivo de plantas em colunas ou caixas, contendo solo ou substrato artificial, pode ajudar a reduzir esforços de amostragem em relação aos estudos em campo e permitir o crescimento sob condições controladas. No entanto, a escavação das raízes e a determinação de medidas de raiz nesses sistemas ainda necessitam de mão de obra intensiva, o que não permite que seja realizada em alta escala. Por outro lado, os sistemas artificiais falharam ao tentar mimetizar a complexa interação que existe entre a planta, e parâmetros abióticos e bióticos intrínsecos do solo e condições ambientais vigentes (Walter et al., 2009). No campo, as raízes e parte aérea são expostas a diferentes condições ambientais, especialmente em relação à temperatura, que é um importante regulador do desenvolvimento do sistema radicular (Hund, 2010). Trachsel et al. (2011) desenvolveram uma metodologia denominada ‘Shovelomics’, que permite a medida de algumas características radiculares no campo. Posteriormente, Bucksch et al. (2014) descreveram uma metodologia de análise de imagem em larga escala de raízes extraídas utilizando o ‘Shovelomics’, implementada e disponibilizada posteriormente

na forma do sistema DIRT (*Digital Imaging of Root Traits*) (Das et al., 2015). A Embrapa adaptou o sistema para análise de raízes de forma mais eficiente em campo, melhorando a segmentação e identificação de itens de forma mais robusta (Santos et al., 2019) do que a proposta originalmente no DIRT.

O uso da fenotipagem não destrutiva possibilita a identificação de características morfológicas envolvidas no desempenho das plantas, a análise de características complexas e a caracterização da base genética e eco-fisiológicas responsáveis pela adaptação das plantas ao seu ambiente. Contudo esse tipo de fenotipagem de raízes em plantas adultas, como raio-x e ressonância magnética (Van Dusschotend et al., 2016), ainda tem um custo muito alto. Em geral, informações sobre a arquitetura radicular no campo e informações sobre o controle genético da arquitetura de raiz permanecem escassos.

Fenotipagem de Sorgo para Eficiência no Uso de Fósforo em solução Nutritiva

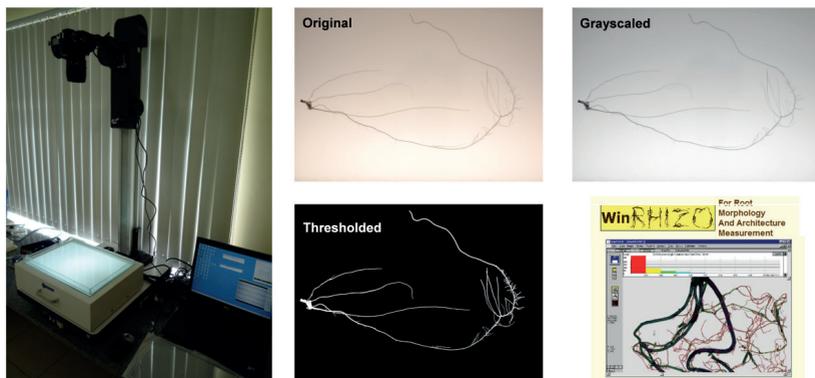
O protocolo de avaliação da morfologia radicular no sistema de pastas com solução nutritiva está detalhado em Sousa et al. (2012) e tem apresentado resultado positivo nos estudos de eficiência no uso de P em sorgo (Hufnagel et al., 2014; Bernardino et al., 2019, 2020). A Figura 6 ilustra a fase inicial dos experimentos instalados em câmara de crescimento. As sementes de sorgo são desinfetadas com hipoclorito de sódio 0,5% por 5 minutos, lavadas com água deionizada e germinadas em papel de germinação em câmara de crescimento. Após quatro dias, as plântulas uniformes para cada uma das repetições biológicas são colocadas em pastas de papel em contato com solução nutritiva com a concentração adequada para a avaliação do estresse ocasionado pela deficiência de P (2,5 uM).



Fotos: Sylvia Morais de Sousa.

Figura 6. Fenotipagem das raízes em câmara de crescimento.

Após 13 dias, o sistema radicular é fotografado, e as imagens obtidas são processadas e analisadas com o auxílio do software WinRhizo para quantificação de características de morfologia radicular, como o comprimento total (cm), diâmetro médio (mm), volume total de raízes (cm³) e o volume de raízes superfinas com o diâmetro entre 0 e 1 mm (cm³) (Figura 7; de Sousa et al., 2012).



Fotos: Sylvia Morais de Sousa.

Figura 7. Processamento da imagem das raízes de sorgo.

Fenotipagem de Sorgo em Solos com Baixo Fósforo

Para fenotipagem em campo em ambientes contrastantes é necessário realizar uma amostragem do solo em toda a área experimental (Figura 8a) para identificar as faixas com baixa disponibilidade P (2,5 a 5 ppm de P em relação ao nível crítico). A Figura 8B mostra as diferenças de desenvolvimento das plantas de sorgo nas faixas com e sem estresse de P. As plantas com deficiência de P apresentam redução no comprimento das folhas, na área foliar e no número de folhas. No experimento em campo podem ser avaliadas diversas características, como o florescimento, a altura de plantas, a produtividade de grãos, o teor de P e a massa seca nos grãos e na palhada (Bernardino et al., 2019, 2020).

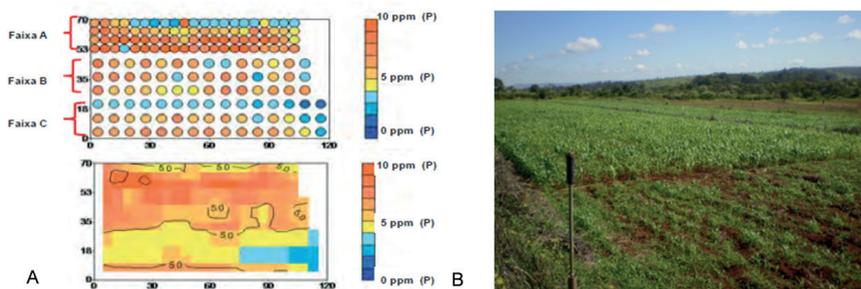


Figura 8. Fenotipagem para a eficiência no uso de fósforo em linhagens de sorgo em campo. Resultado da análise de P no solo na camada 0-20 cm (A). Área experimental com e sem estresse de P (B).

Fonte: Adaptado de Silva (2012).

Alterações na arquitetura do sistema radicular, como raízes laterais ageotrópicas mais longas e mais finas na camada superior do solo (onde os níveis de P são mais elevados), são essenciais para que as plantas absorvam P no solo de maneira mais eficaz (Lynch, 2011). Porém, ainda são poucos os genes validados quanto ao efeito no sistema radicular e adaptação das culturas em solos com baixo P. Um gene da quinase citoplasmática semelhante a um receptor denominado *PHOSPHORUS STARVATION TOLERANCE 1* (*PSTOL1*) descrito por Gamuyao et al. (2012), é o primeiro gene candidato de eficiência de P (tolerância ao baixo teor de P no solo) identificado.

Este gene codifica uma quinase semelhante ao receptor e é responsável por um lócus de característica quantitativa importante para a

absorção de P da raiz do arroz (Wissuwa et al., 2005). As linhagens de arroz com superexpressão de PSTOL1 mostraram maior comprimento total da raiz e área de superfície da raiz (Gamuyao et al., 2012), e maior absorção de P e rendimento de grãos em condições de baixo P em comparação com o controle. O PSTOL1 é expresso nas células primordiais e parenquimáticas da raiz da coroa localizadas fora do cilindro vascular periférico, onde as raízes da coroa são formadas no arroz (Gamuyao et al., 2012).

No sorgo, vários homólogos do *OsPSTOL1* foram apontados por meio de mapeamento associativo com uso de genes candidatos associados à eficiência de P no campo (rendimento de grãos e absorção de P em solo com baixo P) e/ou no laboratório (mudanças na topologia e crescimento da raiz, e absorção de P) (Hufnagel et al., 2014). Neste estudo, esses genes *SbPSTOL1* de sorgo parecem modificar a morfologia e a arquitetura do sistema radicular, levando a aumento no rendimento de grãos em estudos de campo em solo brasileiro de baixo P, e também exibiram maior acúmulo de biomassa e teor de P em variedades locais de sorgo da África Ocidental usando solos nativos. Esses dados sugerem um efeito estável dos alelos-alvo em ambientes e origens genéticas de sorgo (Hufnagel et al., 2014; Bernardino et al., 2019).

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Embrapa Milho e Sorgo pelo suporte na realização da pesquisa.

Referências

- ARAKI, H.; HIRAYAMA, M.; HIRASAWA, H.; IJIMA, M. Which roots penetrate the deepest in rice and maize root systems? **Plant Production Science**, v. 3, n. 3, p. 281-288, 2000.
- BARROS, V. A.; CHANDNANI, R.; SOUSA, S. M. de; MACIEL, L. S.; TOKIZAWA, M.; GUIMARÃES, C. T.; MAGALHÃES, J. V.; KOCHIAN, L. V. Root adaptation via common genetic factors conditioning tolerance to multiple stresses for crops cultivated on acidic tropical soils. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 565339, 2020.

BERNARDINO, K. C.; PASTINA, M. M.; MENEZES, C. B.; SOUSA, S. M.; MACIEL, L. S.; CARVALHO JÚNIOR, G.; GUIMARÃES, C. T.; BARROS, B. A.; SILVA, L. C.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHAES, J. V. The genetic architecture of phosphorus efficiency in sorghum involves pleiotropic QTL for root morphology and grain yield under low phosphorus availability in the soil. **BMC plant biology**, v. 19, n. 87, p. 1-15, 2019.

BERNARDINO, K. C.; MENEZES, C. B. de; SOUSA, S. M. de; GUIMARÃES, C. T.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; HUFNAGEL, B.; PASTINA, M. M.; MAGALHÃES, J. V. de. Association mapping and genomic selection for sorghum adaptation to tropical soils of Brazil in a sorghum multiparental random mating population. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, p. 295-312, 2020.

BUCKSCH, A.; BURRIDGE, J.; YORK, L. M.; DAS, A.; NORD, E.; WEITZ, J. S. LYNCH, J. P. Image-based high-throughput field phenotyping of crop roots. **Plant Physiology**, v. 166, n. 2, p. 470-486, 2014.

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; et al. Genetic diversity for aluminum tolerance in sorghum. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 114, n. 5, p. 863-876, 2007.

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; HAMBLIN, M.; BILLOT, C.; RAMI, J.-F.; HUFNAGEL, B.; KOCHIAN, L. V.; LIU, J.; GARCIA, A. A. F.; HASH, C. T.; RAMU, P.; MITCHELL, S.; KRESIVICH, S.; OLIVEIRA, A. C. de; AVELLAR, G. de; BORÉM, A.; GLASZMANN, J.-C.; SCHAFFERT, R. E.; MAGALHÃES, J. V. The relationship between population structure and aluminum tolerance in cultivated sorghum. **PlosOne**, v. 6, n. 6, e20830, 2011.

CARVALHO JÚNIOR, G.; SCHAFFERT, R. E.; MALOSETTI, M.; VIANA, J. H. M.; MENEZES, C. B.; SILVA, L. A.; GUIMARÃES, C. T.; COELHO, A. M.; KOCHIAN, L. V.; EEUWIJK, F. A. van; MAGALHÃES, J. V. Back to acid soil fields: the citrate transporter SbMATE is a major asset for sustainable grain yield for sorghum cultivated on acid soils. **G3 Genes, Genomes, Genetics**, v. 6, n. 2, p. 475-484, 2015.

CIERESZKO, I.; JOHANSSON, H.; HURRY, V.; KLECZKOWSKI, L. A. Phosphate status affects the gene expression, protein content and enzymatic activity of UDP-glucose pyrophosphorylase in wild-type and pho mutants of *Arabidopsis*. **Planta**, v. 212, n. 4, p. 598-605, 2001.

COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. **Seja o doutor do seu sorgo**. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 24 p. il. (Arquivo do Agrônomo, 14). Encarte do Informações Agronômicas, n. 100, dez. 2002.

DAS, A.; SCHNEIDER, H.; BURRIDGE, J.; ASCANIO, A. K.; WOJCIECHOWSKI, T.; TOPP, C. N.; LYNCH, J. P.; WEITZ, J. S.; BUCKSCH, A. Digital imaging of root traits (DIRT): a high-throughput computing and collaboration platform for field-based root phenomics. **Plant Methods**, v. 11, article 51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0093-3>.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Aluminum phytotoxicity: effects, tolerance mechanisms and its genetic control. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001.

FERREIRA, R. P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J. B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. 35 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 63).

GAMUYAO, R.; CHIN, J. H.; PARIASCA-TANAKA, J.; PESARESI, P.; CATAUSAN, S.; DALID, C.; LOEDIN, I. S.; TECSON-MENDOZA, E. M.; WISSUWA, M.; HEUER, S. The protein kinase Pst11 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. **Nature**, v. 488, p. 535-539, 2012.

HUFNAGEL, B.; SOUSA, S. M. de; ASSIS, L.; GUIMARÃES, C. T.; LEISER, W.; AZEVEDO, G. C.; NEGRI, B.; LARSON, B. G.; SHAFF, J. E.; PASTINA, M. M.; BARROS, B. A.; WELTZIEN, E.; RATTUNDE, H. F. W.; VIANA, J. H.; CLARK, R. T.; FALCÃO, A.; GAZAFFI, R.; GARCIA, A. A. F.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHÃES, J. V. Duplicate and conquer: multiple homologs of PHOSPHORUS-STARVATION TOLERANCE1 enhance phosphorus acquisition and sorghum performance on low-phosphorus soils. **Plant Physiology**, v. 166, p. 659-677, 2014.

JAIN, A.; VASCONCELOS, M. J.; RAGHOTHAMA, K. G. Molecular mechanisms of plant adaptations to phosphate deficiency. **Plant Breeding Reviews**, v. 29, p. 359-419, 2007.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, 1995.

HUND, A. Genetic variation in the gravitropic response of maize roots to low temperatures. **Plant Root**, v. 4, p. 22-30, 2010.

KATO, Y.; ABE, J.; KAMOSHITA, A.; YAMAGISHI, J. Genotypic variation in root growthn glein rice (*Oryza sativa* L.) and its association with deep root development in up land fields with different water regimes. **Plant and Soil**, v. 287, n.1/2, p. 117-129, 2006.

LIAO, H.; RUBIO, G.; YAN, X.; CAO, A.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. **Plant and Soil**, v. 232, p. 69-79, 2001.

LÓPEZ-ARREDONDO, D. L.; LEYVA-GONZÁLEZ, M. A.; GONZÁLEZ-MORALES, S. I.; LÓPEZ-BUCIO, J.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 95-123, 2014.

LUCHI, S.; KOYAMA, H.; LUCHI, A.; KOBAYASHI, Y.; KITABAYASHI, S.; KOBAYASHI, Y.; IKKA, T.; HIRAYAMA, T.; SHINOZAKI, K.; KOBAYASHI, M.; Zinc finger protein STOP1 is critical for proton tolerance in Arabidopsis and coregulates a key gene in aluminum tolerance. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n. 23, p. 9900-9905, 2007.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1041-1049, 2011.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Root strategies for phosphorus acquisition. In: WHITE, P. J.; HAMMOND, J. P. (ed.). **The ecophysiology of plantphosphorus interactions**. Dordrecht: Springer, 2008. p. 83-116.

MAGALHÃES, J. V.; GARVIN, D. F.; WANG, Y. H.; SORRELLS, M. E.; KLEIN, P. E.; SCHAFFERT, R. E.; LI, L.; KOCHIAN, L. V. Comparative mapping of a major aluminum tolerance gene in sorghum and other species in the poaceae. **Genetics**, v. 167, n. 4, p. 1905-1914, 2004.

MAGALHÃES, J. V. de; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. de P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y-H.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PINEROS, M. A.; SHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.; TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, v. 39, n. 9, p. 1156-1161, 2007.

MAGALHÃES, J. V.; CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; OLIVEIRA, A. C. de; SCHAFFERT, R. E. **Pré-melhoramento para a tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 5 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 162).

MAGALHÃES, J. V.; GUIMARÃES, C. T. **Tolerância ao alumínio em sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 6 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 106).

MAGNAVACA, R.; GARDNER, O.; CLARK, R. B. Inheritance of aluminum tolerance in maize. In: GABELMAN, H. W.; LOUGHMAN, B. C. (ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Springer, 1987. p. 201-212.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition in plants**. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MELO, J. O.; MARTINS, L. G.; BARROS, B. A.; PIMENTA, M. R.; LANA, U. G.; DUARTE, C. E.; PASTINA, M. M.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; FONTES, E. P. B.; MAGALHÃES, J. V. Repeat variants for the SbMATE transporter protect sorghum roots from aluminum toxicity by transcriptional interplay in cis and trans. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 116, n. 1, p. 313-318, 2019.

MENEZES, C. B. de; CARVALHO JÚNIOR, G. A. de; SILVA, L. A.; BERNARDINO, K. C.; SOUZA, V. F.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Combining ability of grain sorghum lines selected for aluminum tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 42-48, 2014.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Melhoramento para eficiência no uso de fósforo. In: BORÉM, A.; FRITSCHÉ-NETO, R. (ed). **Melhoramento de plantas em condições de estresse abiótico**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 101-126.

PINTO, K.; BERTOLDI, C.; DELATORRE, C. A. Arabdopsis thaliana conditional mutant deficient in phosphorus signaling. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 132-133.

PRADA, D. Molecular population genetics and agronomic alleles in seed banks: searching for a needle in a haystack? **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 9, p. 2541-2552, 2009.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, T. T.; SOUSA, S. M. de; CAMPOLINO, M. L.; LANA, U. G. de P.; COELHO, A. M. **Metodologia para processamento de imagens digitais do sistema radicular de milho e sorgo utilizando a plataforma Digital Imaging of Root Traits (DIRT)**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2019. 21 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 47).

SASAKI, T.; YAMAMOTO, Y.; EZAKI, B.; KATSUHARA, M.; JU AHN, S.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; MATSUMOTO, H. A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter. **Plant Journal**, v. 37, n. 5, p. 645-653, 2004.

- SILVA, L. A. **Fenotipagem para a eficiência de fósforo em linhagens de sorgo**. 2012. 83 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2012.
- SOUSA, S. M. de; CLARK, R. T.; MENDES, F. F.; OLIVEIRA, A. C. de; VASCONCELOS, M. J. V. de; PARENTONI, S. N.; KOCHIAN, L. V.; GUIMARAES, C. T.; MAGALHAES, J. V. A role for root morphology and related candidate genes in P acquisition efficiency in maize. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 39, n. 11, p. 925-935, 2012.
- SUH, S.; YEE, S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US. **Chemosphere**, v. 84, n. 6, p. 806-813, 2011.
- TRACHSEL, S.; KAEPLER, S. M.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant and Soil**, v. 341, n. 1/2, p. 75-87, 2011.
- VAN DUSSCHOTEN, D.; METZNER, R.; KOCHS, J.; POSTMA, J. A.; PFLUGFELDER, D.; BÜHLER, J.; SCHURR, U.; JAHNKE, S. Quantitative 3D analysis of plant roots growing in soil using magnetic resonance imaging. **Plant Physiology**, v. 170, n. 3, p. 1176-1188, 2016.
- WALTER, A.; SILK, W. K.; SCHURR, U. Environmental effects on spatial and temporal patterns of leaf and root growth. **Annual Review of Plant Biology**, v. 60, p. 279-304, 2009.
- WISSUWA, M.; GAMAT, G.; ISMAIL, A. M. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations? **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 417, p. 1943-1950, 2005.
- YAMAJI, N.; HUANG, C. F.; NAGAO, S.; YANO, M.; SATO, Y.; NAGAMURA, Y. A zinc finger transcription factor ART1 regulates multiple genes implicated in aluminum tolerance in rice. **Plant Cell**, v. 21, n. 10, p. 3339-3349, 2009.
- ZHU, J. M.; KAEPLER, S.; LYNCH, J. Topsoil foraging and phosphorus acquisition efficiency in maize. **Functional Plant Biology**, v. 32, n. 8, p. 749-762, 2005.

ZHU, J. M.; LYNCH, J. P. The contribution of lateral rooting to phosphorus acquisition efficiency in maize seedlings. **Functional Plant Biology**, v. 31, n. 10, p. 949-958, 2004.

ZHU, J.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays L.*). **Plant, Cell & Environment**, v. 33, n. 5, p. 740-749, 2010.

Literatura Recomendada

BLACKWELL, M.; DARCH, T.; HASLAM, R. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvements. **Frontiers of Agricultural Science Engineering**, v.6, n. 4, p. 332-340, 2019.

MOONEY, S. J.; PRIDMORE, T. P.; HELLIWELL, J.; BENNETT, M. J. Developing X-ray Computed Tomography on-Invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1/2, p. 1-22, 2012.

RENGEL Z. Disturbance of cell Ca^{2+} homeostasis as a primary trigger of Al toxicity syndrome. **Plant, Cell & Environment**, v. 15, n. 8, p. 931-938, 1992.

TABASSUM, B.; KHAN, A.; TARIQ, M.; RAMZAN, M.; KHAN, M. S. I.; SHAHID, N.; AALIYA, K. Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR **Applied Soil Ecology**, v. 121, p. 102-117, 2017.

Capítulo 16

Sorgo para Alimentação Humana

Valéria Aparecida Vieira Queiroz

Frederico Augusto Ribeiro de Barros

Leandro de Moraes Cardoso

Hércia Stampini Duarte Martino

Helena Maria Pinheiro-Sant'Ana

Cícero Beserra de Menezes

Introdução

Embora quase a totalidade dos grãos de sorgo produzidos no Brasil e na maioria dos países ocidentais seja destinada à alimentação animal, nos últimos tempos, a demanda por esse cereal para consumo humano vem crescendo ano a ano. Os principais motivos para essa demanda em ascensão são o fato de o sorgo ser um cereal isento de glúten, o que o torna excelente alternativa para produção de alimentos “gluten-free”, e os resultados de pesquisas demonstrando os benefícios do sorgo na saúde humana (Asif et al., 2010; Queiroz et al., 2011; Awika; Rooney, 2004; Awika et al., 2009; Barros et al., 2012; Burdette et al., 2010; Moraes et al., 2012). Adicionalmente, as vantagens agrônômicas do sorgo, como baixo custo de produção, resistência à seca, alta produtividade, entre outras, o colocam em posição de destaque entre os cereais usualmente cultivados e consumidos no Brasil.

Os alimentos funcionais têm despertado grande interesse, uma vez que além das suas funções de nutrir, trazem benefícios à saúde. Existem no sorgo variados compostos bioativos, capazes de promover a saúde, como diversos compostos fenólicos (Awika et al., 2005), carotenoides, vitamina E (Cardoso et al., 2015), minerais (Paiva et al., 2017), amido resistente (Teixeira et al., 2016), fibras, entre outros (Queiroz et al., 2015). Esses compostos, principalmente os fenólicos, modulam parâmetros relacionados às doenças crônicas não transmissíveis, como a obesidade (Barros et al., 2012, 2014), o câncer (Awika et al., 2009; Yang et al., 2012), as doenças cardiovasculares (Carr et al., 2005) e o diabetes (Lakshmi; Vimala 1996). Nesse contexto, de acordo com os estudos supracitados, pode-se afirmar que o sorgo possui

grande potencial para ser usado não apenas como ingrediente na produção de alimentos isentos de glúten, mas também colaborando com propriedades funcionais. Diversos estudos, com animais (Moraes et al., 2012, 2018; Sousa et al., 2018, 2019) e com humanos (Arbex et al., 2018; Anuniação et al., 2017, 2019; Lopes et al., 2018, 2019), vêm comprovando esses efeitos benéficos do sorgo na saúde humana.

Todavia, o tipo e a concentração desses compostos nos grãos de sorgo, bem como a qualidade tecnológica das farinhas, dependem do genótipo (Waniska; Rooney, 2000). Assim, a seleção de genótipos promissores e o melhoramento genético deles, visando o desenvolvimento de cultivares mais apropriadas para uso na alimentação humana, são de fundamental importância.

Diante do exposto, são apresentadas, neste capítulo, informações a respeito do potencial do sorgo para produção de alimentos, além de evidências científicas que associam a utilização do cereal a potenciais benefícios para a saúde humana, em função de sua composição nutricional e de seus compostos bioativos.

Potencial do Sorgo para Produção de Alimentos com Substituição Total ou Parcial do Trigo

Estima-se que o sorgo seja utilizado como alimento básico por mais de 500 milhões de pessoas, que vivem em países em desenvolvimento, principalmente da África e da Ásia. Nesses países esse cereal chega a suprir 70% da ingestão calórica diária, tendo, dessa forma, papel fundamental na segurança alimentar (Rooney; Awika, 2005; Dicko et al., 2006). Diversos tipos de alimentos são preparados utilizando-se o sorgo como ingrediente nessas regiões. Na África, o sorgo é consumido após um processo de fermentação ou não, na forma de pães, como o kiswa (Sudão) e mingaus, como o kogobe (África), ogi (Nigéria) ou o to (África Ocidental), dentre outros tipos de alimentos (Abdelghafor et al., 2011; Jadhav; Annapure, 2013; Ratnavathi; Patil, 2013). Na Índia, uma das principais formas de consumo do sorgo é o roti, um tipo de pão achatado que não utiliza fermento em sua formulação, além do annam (sorgo cozido), sankati e kanji, mingaus grosso e fino, respectivamente. Entretanto, por causa principalmente da urbanização e da facilidade de acesso a outros cereais refinados, o consumo do sorgo apresentou ligeiro declínio nesse país, mas, segundo Ratnavathi e Patil, (2013), após ser atribuído ao sorgo o título de alimento saudável, observou-

se um novo aumento de seu consumo na Índia.

Por outro lado, fontes alternativas de farinhas sem glúten, para substituição do trigo na produção de alimentos sem glúten, têm sido utilizadas em diversos outros países, por causa do aumento dos casos de indivíduos com sensibilidade a essa proteína. Frente a esta nova demanda, além das farinhas, diversos produtos à base de sorgo têm sido desenvolvidos e avaliados, como produtos de panificação e confeitaria, massas alimentícias, snacks, tortilhas e bebidas (Aboubacar et al., 2006; Kayodé et al., 2007; Schober et al., 2007; Velázquez et al., 2012; Yousif et al., 2012; Devi et al., 2013; Vargas-Solórzano et al., 2014; Winger et al., 2014; Queiroz et al., 2018), conforme descrito a seguir.

Os produtos de panificação, principalmente os fabricados a partir de farinha de trigo, são largamente consumidos no mundo, tornando-se de grande importância tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento (Velázquez et al., 2012; Yousif et al., 2012). Por essa razão, a utilização do sorgo em substituição ao trigo nesses produtos se faz relevante (Hugo et al., 2003; Schober et al., 2005, 2007; Abdelghafor et al., 2011). Entretanto, o uso do sorgo na panificação requer a aplicação de tecnologias adicionais, pois esse cereal não possui as proteínas gliadina e glutenina, que formam o glúten, o qual é responsável pela estrutura e maciez características de produtos fabricados com trigo (Schober et al., 2005; Abdelghafor et al., 2011). Assim, a utilização do sorgo na panificação é um processo mais complexo, e a associação com outros tipos de farinhas, além de tecnologias adicionais, pode conferir melhores resultados aos produtos.

Nesse contexto, Abdelghafor et al. (2011) substituíram a farinha de trigo pelas farinhas de sorgo provenientes de grãos integrais e de grãos decorticados no preparo de pães dos tipos francês e sírio, e observaram que a maior porcentagem de substituição (20%) produziu pão francês de menor volume e pão tipo sírio com menor circunferência. A aceitação desses produtos foi inversamente proporcional à adição das farinhas de sorgo. Por outro lado, estudos de Yousif et al. (2012) mostraram que pães tipo sírio formulados com farinhas integrais de sorgo branca (30% e 50%) e vermelha (40% e 50%) apresentaram melhor aceitação que os formulados com trigo, bem como elevado conteúdo de compostos fenólicos e menor concentração de amido rapidamente digerível, características que podem trazer redução do estresse oxidativo e do índice glicêmico. Hugo et al. (2003) demonstraram que a adição de 30% de farinha fermentada melhorou o volume do pão, o

peso e a firmeza do miolo desses. Este processamento também foi utilizado por Schober et al. (2007) no preparo de pão de sorgo isento de glúten, porém, foi necessária a adição de 2% de hidroxipropilmetilcelulose e 30% de amido de batata, em 70% de farinha de sorgo fermentada. A associação destes ingredientes preveniu a formação de orifícios no miolo e o achatamento da superfície, garantindo a produção de um pão de sorgo de melhor qualidade (Schober et al., 2005).

A farinha de sorgo também tem sido utilizada no desenvolvimento de massas alimentícias destinadas tanto ao mercado de produtos sem glúten quanto ao de alimentos saudáveis (Suhendro et al., 2000; Liu et al., 2012; Khan et al., 2013). Nesse sentido, Liu et al. (2012) obtiveram macarrão instantâneo de boa qualidade com farinhas de sorgo mais finas e maior concentração de amido modificado, conferindo ao produto maior firmeza e resistência. Visando os benefícios à saúde, associados ao consumo de compostos fenólicos e de amido resistente (AR), Khan et al. (2013) produziram macarrão de sorgo a partir de grãos de pericarpo vermelho e de pericarpo branco, nas concentrações de 20%, 30% e 40% e demonstraram que, em todos os níveis de adição de sorgo, houve aumento no conteúdo desses compostos e atividade antioxidante em relação ao controle, elaborado com farinha de trigo. Entretanto, a cocção reduziu as concentrações dos compostos fenólicos por lixiviação para água de cocção ou por termodegradação, mas não alterou o conteúdo de AR. Nessa mesma linha de pesquisa, Paiva et al. (2019) avaliaram características químicas e de cozimento e a aceitabilidade sensorial de três massas secas à base de 100% de farinha de sorgo, 50% de farinha de sorgo e 50% de farinha de milho e 100% de farinha de milho, frente a um painel de indivíduos celíacos e não celíacos. O produto elaborado com 100% de farinha de sorgo apresentou conteúdos significativamente mais altos de proteína, lipídeos, cinzas, fibra e fenólicos totais, em comparação com os demais. A perda de sólidos dos produtos variou de 5,04% a 10,54%, parâmetro de qualidade considerado adequado para macarrão. Embora o público composto por pessoas não celíacas tenha preferido a massa com 100% de farinha de milho, aquela elaborada com 100% de farinha de sorgo apresentou aceitabilidade satisfatória entre os provadores portadores da doença celíaca. Os resultados acima demonstram o potencial deste ingrediente na produção de massas alimentícias destinadas ao público com sensibilidade ao glúten, bem como aos indivíduos interessados em uma alimentação mais saudável, rica de componentes funcionais.

Cookies de chocolate foram desenvolvidos a partir de diferentes combinações de farinhas de sorgo, de arroz e de milho por Ferreira et al. (2009). Dentre as características físicas e químicas os cookies contendo farinha de sorgo não diferiram do produto comercial, e os atributos sensoriais apresentaram diferença apenas para cor e odor. Da mesma forma, Serrem et al. (2011) verificaram boa aceitação de biscoitos elaborados com farinha de sorgo associada à farinha de soja desengordurada. Além da crocância e da textura, semelhantes ao biscoito comum, a associação das farinhas aumentou a qualidade da proteína contida neste tipo de produto.

Há um grande interesse no desenvolvimento de produtos extrusados, como snacks e cereais matinais, em razão do seu mercado em todo o globo. Usualmente, estes produtos são elaborados a partir da utilização de trigo, milho e arroz. Entretanto, a grande demanda pelo desenvolvimento de novos produtos com associação ao valor nutritivo tem sido alvo da indústria e da pesquisa com alimentos (Devi et al., 2013). González (2005) demonstrou que o sorgo, além de produzir extrusados de excelente sabor, aparência e textura, acrescentou propriedades bioativas provenientes dos seus compostos fenólicos. Vargas-Solórzano, et al (2014) avaliaram extrusados de sorgo elaborados com genótipos de pericarpos branco (CMSXS180 e 9010032), vermelho (BRS 310 e BRS 308) e marrom (BRS 395 e 9929034) frente às suas diversidades, como o tipo de amido, os componentes não amiláceos e os compostos fenólicos. Foi observado que a utilização de farinhas integrais com maior conteúdo de compostos não amiláceos, como fibra alimentar e taninos, produziram extrusados com menor índice de expansão seccional. Entretanto, extrusados de baixa expansão seccional conferiram boas propriedades de extensibilidade durante o desenvolvimento da massa, que podem ser utilizadas no desenvolvimento de biscoitos e wafers com elevada qualidade nutricional. Por outro lado, máxima expansão seccional foi obtida com o extrusado de sorgo de pericarpo vermelho (BRS 310), de baixo conteúdo de fibra alimentar e taninos, que expandiu similarmente ao extrusado de pericarpo branco. Estes genótipos de sorgo têm potencial na formulação de bebidas instantâneas por causa da sua difusão em água, em temperatura ambiente. A elaboração de produtos extrusados à base de sorgo é uma opção extremamente viável para o incentivo da utilização do sorgo na alimentação humana. Entretanto, há ainda a necessidade de estabelecer as condições de processo e, principalmente, a seleção de genótipos que apresentem características químicas e nutricionais desejáveis. Além disso,

é essencial avaliar a retenção de nutrientes e de compostos bioativos em diferentes condições de extrusão, visando a escolha daquelas que provoquem menores perdas.

As barras de cereais são produtos associados à alimentação saudável, sendo seu consumo elevado (Sampaio et al., 2009). Tendo em vista este mercado, foi desenvolvida uma barra de cereal adicionada de 7,2% de pipoca de sorgo, preparada de forma convencional. A aceitação do produto foi avaliada em Londrina-PR e no Rio de Janeiro. Verificou-se que o produto foi aceito por 98,4 e 76,5% dos consumidores, sendo a média da aceitação, em uma escala de 1 a 9, de 7,7 e 7,1 para Londrina e Rio de Janeiro, respectivamente (Queiroz et al., 2012). As barras de cereais com pipoca de sorgo apresentaram vida de prateleira semelhante a aqueles sem aditivos, encontradas no mercado (Paiva et al., 2012). Posteriormente, outra barra de cereais foi desenvolvida com pipoca de sorgo e extrusados de sorgo na forma de flocos, cuja avaliação sensorial foi realizada por um painel composto por indivíduos celíacos e outro por não celíacos, os quais não apresentaram diferença quanto à aceitação global da amostra. A vida de prateleira do produto a 25 °C foi estimada em 163 ± 52 dias (Paiva et al., 2018). Esses estudos sugerem que os coprodutos de sorgo podem ser utilizados com sucesso na formulação de barras de cereais sem glúten.

Mingau e cuscuz, elaborados com farinha de sorgo, são preparações largamente utilizadas na África e na Índia, e a qualidade destas foi avaliada por Aboubacar et al. (2006) a partir de diferentes níveis de decorticação dos grãos. Farinhas de grãos decorticados (apenas o endosperma) de coloração mais clara, assim como cuscuz, foram obtidas a partir de uma maior porcentagem de remoção do pericarpo. Do mesmo modo, a firmeza do gel no preparo do mingau também aumentou com o maior nível de decorticação. Por outro lado, a presença de taninos nos grãos aumentou significativamente a atividade antioxidante (AA), contrariamente ao processo de decorticação. Já Dlamini et al. (2007) mostraram que a cocção convencional no preparo de mingau, utilizando-se sorgo integral fermentado ou não, apresentou elevada AA em relação aos que foram cozidos por extrusão. Por outro lado, o processo de extrusão no preparo de mingau pode quebrar as ligações químicas da molécula de tanino. Assim, aumenta-se a extração de oligômeros de taninos, no entanto, reduz-se sua concentração. Acredita-se que esta reorganização na estrutura dos taninos possa aumentar a biodisponibilidade destes compostos (Dlamini et al., 2007). Desta forma, a utilização do sorgo decorticado reduz

a AA do cereal e os benefícios que seriam vinculados ao uso do grão integral. Entretanto, a adequação do processamento pode melhorar as características sensoriais do produto e alterar a biodisponibilidade de seus componentes.

As tortilhas são o segundo tipo de pão de maior consumo no continente americano, podendo ser usadas em diversos tipos de preparações. A utilização do sorgo no preparo de tortilhas vem sendo estudada como uma fonte alternativa de compostos antioxidantes, fibra alimentar e em substituição ao trigo em produtos destinados a portadores de doença celíaca (Winger et al., 2014). Assim, Winger et al. (2014) utilizaram farinhas de sorgo de grãos sem taninos e decorticados, no preparo de tortilhas isentas de glúten e observaram que aquelas com menor tamanho de partícula e maior conteúdo de amido proporcionaram melhor rendimento, maciez e extensibilidade do produto. Além disso, estas farinhas melhoraram a aparência do produto por apresentarem-se mais homogêneas.

O sorgo também tem sido utilizado na produção de bebidas fermentadas ou não. Nesse contexto, Queiroz et al. (2018) desenvolveram dois formulados em pó hidrossolúveis sem glúten à base de farinhas extrusadas de sorgos com taninos (PDT-3670) e sem taninos (PDTF-7064), para uso como bebida tipo “shake” em dietas de restrição calórica. Ambos os produtos foram bem aceitos em todos os atributos sensoriais, com índice de aceitação entre 70.9 e 93.2%. O formulado com taninos teve maior aceitação sensorial quanto ao sabor e aparência geral e maior intenção de compras que o sem taninos, bem como maior atividade antioxidante e teores de compostos fenólicos totais, taninos e antocianinas totais. Além disso, os dois formulados continham altos teores de fibras (7.9 - 9.1 g/100 g) e podem ser fontes de proteínas (18.5 g/100 g). Os resultados mostraram que os taninos não influenciaram negativamente na aceitação do produto PDT-3670 e proporcionaram melhoria nas propriedades funcionais. O formulado preparado à base de farinha de sorgo rico em taninos pode beneficiar o público que necessita de dieta com restrição calórica, já que os taninos conferem alto poder de saciedade e podem se complexar com o amido, resultando em menor disponibilidade deste para absorção e formação de amido resistente, o qual não é digerido e absorvido pelo organismo.

Embora a cerveja não seja considerada um alimento, a produção desta bebida é proveniente da fermentação de cereais como cevada, centeio e trigo (Hager et al., 2014). De maneira semelhante à substituição dos cereais nos produtos convencionais, o sorgo também é utilizado na elaboração de bebidas

fermentadas como as cervejas. Assim, são estudados os tipos de germinação, fermentação e possíveis efeitos destes processos sobre a biodisponibilidade de ferro e de zinco neste tipo de produto (Kayodé et al., 2007; Lyumugabe et al., 2014). Segundo Zweytick e Berghofer (2009), a cerveja de sorgo é mais viscosa e levemente adocicada, sendo que sua coloração pode variar de amarelada a rosada se o malte de sorgo for adicionado de milho ou milho, respectivamente. Alguns estudos estão sendo conduzidos no Brasil, numa parceria entre a Embrapa Milho e Sorgo e outras instituições, visando desenvolver uma cerveja sem glúten, à base de sorgo com características sensoriais adaptadas ao hábito do brasileiro, a fim de contribuir para atender a demanda desse tipo de produto por parte de indivíduos que possuem sensibilidade ao glúten.

Fotos: Guilherme Viana



A



B

Fotos: Valéria Vieira Queiroz



C



D

Foto: Alexandre Esteves Neves

Fotos: Valéria Vieira Queiroz

Figura 1. Exemplos de produtos inovadores à base de grãos e farinha de sorgo desenvolvidos pela Embrapa Milho e Sorgo e parceiros: (A) Barra de cereais com pipoca de sorgo, (B) Bolo de sorgo com banana, (C) Pão de sorgo e (D) Cookies de sorgo com amendoim.

COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DO SORGO

O valor nutricional do sorgo é semelhante ao do milho e varia bastante entre as cultivares, sendo influenciado, também, pelas condições do

ambiente onde é cultivado (Waniska; Rooney, 2000). O amido é o principal componente dos grãos, seguido pelas proteínas, polissacarídeos não amiláceos e lipídios (Dicko et al., 2006). A Tabela 1 mostra a composição química de grãos de sorgo e de seus diferentes tecidos anatômicos (pericarpo, endosperma e gérmen) de acordo com Waniska e Rooney (2000). Na Tabela 2 encontra-se a composição química de oito genótipos de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo (Martino et al., 2009). Verifica-se que, para proteínas, lipídios e cinzas, há menor variação nos teores relatados por Martino et. al (2012) em relação àqueles citados por Waniska e Rooney (2000). Porém, em ambas as referências há coerência entre os dados apresentados, exceto para fibras, cujos teores são menores na Tabela 1 em relação à Tabela 2; isto pode ser causado por diferenças entre os métodos de análise utilizados pelos autores.

Tabela 1. Composição química (%) de grãos de sorgo inteiros e em seus diferentes tecidos anatômicos.

Nutrientes (%)		Grão inteiro	Endosperma	Germe	Pericarpo
Proteínas	Média	11,3	10,5	18,4	6,0
	Min - máx	7,3 – 15,6	8,7 – 13,0	17,8 – 19,2	5,2 – 7,6
	Distribuição	100	80,9	14,9	4,0
Fibras	Média	2,7	-	-	-
	Min - máx	1,2 – 6,6	-	-	-
	Distribuição	100	-	-	-
Lipídios	Média	3,4	0,6	28,1	4,9
	Min - máx	0,5 – 5,2	0,4 – 0,8	26,9 – 30,6	3,7 – 6,0
	Distribuição	100	13,2	76,2	10,6
Cinzas	Média	1,7	0,4	10,4	2,0
	Min - máx	1,1 – 2,5	0,3 – 0,4	-	-
	Distribuição	100	20,6	68,6	10,8
Amido	Média	71,8	82,5	13,4	4,6
	Min - máx	55,6 – 75,2	81,3 – 83,0	-	-
	Distribuição	100	94,4	1,8	3,8

Fonte: Adaptado de Waniska e Rooney (2000).

Tabela 2. Composição química (%) e valor calórico (kcal) de genótipos de sorgo, da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Nutriente	Genótipo											
	BR501	BR007B	BRS310	BR700	BRS309	BRS305	BR506	CMSXS136	Média	Min - máx		
Proteína (%)	9,91	10,31	11,59	8,57	11,97	10,11	11,43	10,99	10,61	8,5 – 11,97		
Lipídios (%)	3,07	2,33	2,61	1,94	2,48	2,60	2,36	1,24	2,33	1,24 – 3,07		
Carboidratos (%)	73,90	73,97	71,80	76,36	72,92	73,48	72,37	73,69	73,56	71,8 – 76,36		
Fibras solúveis (%)	0,17	0,29	0,7	0,83	0,88	0,15	0,63	0,28	0,49	0,15 – 0,88		
Fibras insolúveis (%)	11,01	9,23	9,01	10,85	8,3	11,28	14,46	8,85	10,37	8,3 – 14,46		
Fibras totais (%)	11,18	9,52	9,71	11,68	9,18	11,43	15,09	9,13	10,87	9,13 – 15,09		
Cinzas (%)	1,51	1,46	1,43	1,23	1,36	1,32	1,93	1,49	1,47	1,23 – 1,93		
Água (%)	11,59	11,90	12,85	11,88	11,25	12,45	11,89	12,56	12,05	11,25 – 12,85		
Calorias (kcal)	362,8	358,0	357,0	357,1	361,8	357,7	356,4	349,8	357,6	349,8 – 362,8		

Fonte: Adaptado de Martino et al. (2012)

De acordo com Martino et al. (2012), as proteínas dos oito genótipos variaram entre 8% e 12%, entretanto, as proteínas dos grãos de sorgo são consideradas de baixo valor biológico por serem deficientes em lisina, aminoácido essencial para o organismo humano. De acordo com a classificação baseada na solubilidade, as proteínas dos grãos de sorgo têm sido divididas em albuminas, globulinas, kafirinas (prolaminas) e glutelinas (Dicko et al., 2006). Pelo fato de as kafirinas serem proteases resistentes, a digestibilidade das proteínas do sorgo é considerada baixa quando comparada à de outros cereais (Anglani, 1998). A pré-fermentação e a extrusão dos grãos podem aumentar a digestibilidade delas, ao passo que a cocção deles pode levar à redução da digestibilidade dessas proteínas. Além desses fatores, a baixa digestibilidade apresentada pelo cereal pode ser devida, também, a interações proteína-proteína, proteína-carboidrato, proteína-polifenol e carboidrato-polifenol existentes (Taylor; Taylor, 2002).

O sorgo, assim como a maioria dos demais cereais, possui baixo teor de lipídios (Tabelas 1 e 2), os quais estão presentes, principalmente, no germe. A composição lipídica dos grãos é semelhante à do milho, com grande concentração de ácidos graxos poli-insaturados (Glew et al., 1997; Anglani, 1998). Já as fibras concentram-se no pericarpo (Tabela 1), com maior proporção de fibras do tipo insolúvel. Tanto a concentração de lipídios quanto de fibras na farinha de sorgo dependerá da extensão da remoção do pericarpo e do gérmen, nos processos de decorticação, degerminação e moagem dos grãos.

O valor energético total da farinha de sorgo obtido dos genótipos da Embrapa Milho e Sorgo avaliados por Martino et al. (2012) variou entre 349,8 e 362,8 kcal, com média de 357,6 kcal, corroborando com o valor de 356 kcal/100 g relatado por Dicko et al. (2006).

Os minerais, que na Tabela 2 são representados pelas cinzas, encontram-se em maior concentração no gérmen, por volta de 68% do total do grão. Glew et al. (1997) e Anglani (1998) relataram ser o sorgo boa fonte de mais de 20 minerais, como fósforo, potássio, ferro e zinco. Martino et al. (2012) também quantificaram a concentração dos minerais Mn, Cr, Zn, Pb, Ni, Cd, Cu, Fe, Mg, Ca, P, Al e S nos mesmos oito genótipos de sorgo apresentados na Tabela 2 e observaram que, de todos os elementos investigados, os predominantes foram: o P, o Mg, e o S, com concentrações entre 135,01 e 250,33 mg/100 g; 65,69 a 147,84 mg/100 g⁻¹ e 66,97 e 100,85 mg/100 g⁻¹, respectivamente. Além disso, observaram grande variação nas

concentrações de ferro (0,63 a 5,87 mg 100g⁻¹), sendo que as cultivares BR501, BR506, BRS309 apresentaram os maiores valores deste mineral. Assim, esses autores concluíram que as cultivares de sorgo analisadas apresentam fontes diferenciadas de minerais, podendo ser utilizadas na alimentação humana como fonte de alguns deles.

As concentrações de isômeros da vitamina E: α -, β -, γ -, δ -tocoferóis e α -, β -, γ -, δ -tocotrienóis foram avaliadas nas mesmas cultivares de sorgo da Tabela 2 (Martino et al., 2012). Os autores verificaram que, dos oito isômeros investigados, foram encontrados apenas o α - e γ - tocoferol nos grãos do cereal, com predominância para o último, com concentrações entre 147,33 e 250,40 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ de matéria fresca (MF). O α -tocoferol variou de 60,66 a 136,57 $\mu\text{g}/100\text{ g}$ MF. Dentre as cultivares analisadas, a que mais se destacou com relação à concentração de vitamina E foi a BRS 310, com conteúdo de 386,96 $\mu\text{g}/100\text{ g}$.

Compostos Bioativos Presentes nos Grãos de Sorgo de Interesse na Saúde Humana

Compostos bioativos, promotores da saúde humana, também têm sido descritos nos grãos de sorgo, como diversos compostos fenólicos, amido resistente, fibras, entre outros (Awika; Rooney, 2004; Dicko et al., 2006; Teixeira et al., 2016). Essas substâncias, bastante desejáveis na alimentação humana, encontram-se distribuídas em diferentes partes do grão: pericarpo, testa, camada de aleurona, e endosperma.

Os compostos fenólicos presentes no sorgo são os ácidos fenólicos, como o ácido cafeico, o ferúlico, etc. (Paiva et al., 2015), e os flavonoides, tais como as 3-deoxiantocianinas, flavonas, flavanonas e taninos condensados (Dykes et al., 2005). Eles estão presentes principalmente no pericarpo (farelo) do sorgo e são responsáveis pela sua capacidade antioxidante (Awika et al., 2005). A concentração e a composição de compostos fenólicos presentes nos grãos de sorgo dependem do genótipo e do ambiente onde o cereal é cultivado (Awika, 2003). Algumas cultivares de sorgo, principalmente as de pericarpo negro, marrom ou vermelho (Figura 2), possuem concentrações de fenóis totais e capacidade antioxidante superiores às de outros cereais (Figuras 2 e 3).



Foto: Frederico Barros

Figura 2. Cultivares de sorgo com diferentes cores de pericarpo.

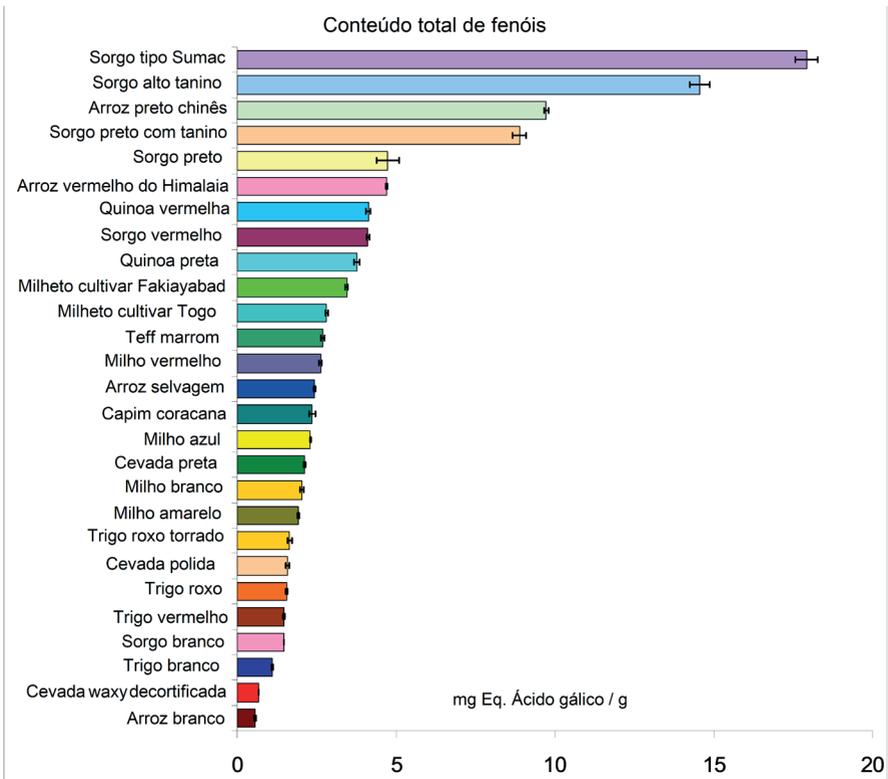


Figura 3. Concentração de fenólicos totais (mg ácido gálico equivalente/g) entre os cereais (Awika, 2003).

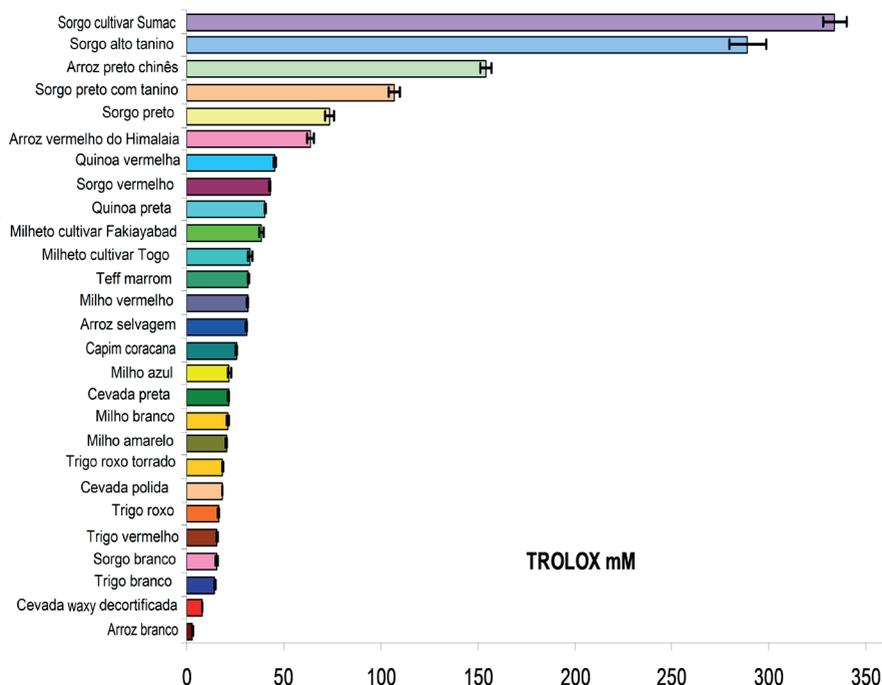


Figura 4. Capacidade antioxidante (Trolox mM) entre os cereais.

Fonte: Adaptado de Awika (2003).

Dessa forma, é importante ressaltar que o sorgo é um cereal com potencial funcional, uma vez que contém compostos bioativos que possuem papel importante na redução dos riscos de doenças crônicas não transmissíveis, portanto, promovem benefícios à saúde humana. A seguir são detalhadas mais informações a respeito dos principais compostos bioativos do sorgo.

Taninos

Os taninos do sorgo são do tipo condensados, também chamados proantocianidinas. Eles são constituídos de oligômeros ou polímeros de catequinas (flavan-3-ols e/ou flavan-3,4-diols) e estão presentes somente em cultivares de sorgo que possuem testa pigmentada conforme se pode visualizar na Figura 5 (Hagerman; Butler, 1980; Dykes et al., 2005).

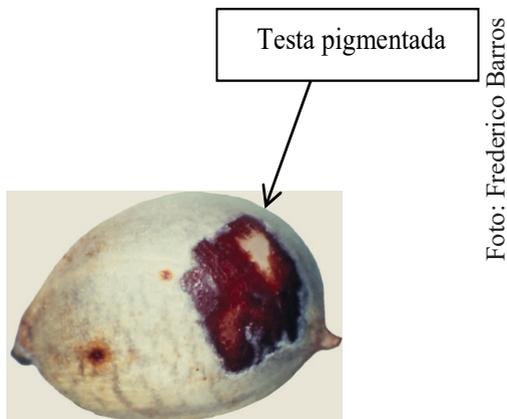


Figura 5. Testa pigmentada no grão de sorgo.

O sorgo apresenta a maior concentração de taninos condensados entre os cereais, os quais variam de acordo com o tipo, a concentração e a distribuição de monômeros, oligômeros e polímeros (Serna-Saldivar; Rooney, 1995). Os genótipos de sorgo são classificados como tipo I, não possuem testa pigmentada e não possuem taninos; tipo II, possuem testa pigmentada e os taninos são extraídos em baixa concentração usando metanol acidificado e têm maior prevalência de catequinas e oligômeros; e tipo III, possuem testa pigmentada e os taninos são extraídos em alta concentração usando metanol ou acetona/água sem a necessidade de acidificação e têm maior prevalência de polímeros (Hahn; Rooney, 1986; Price et al., 1978; Barros et al., 2014).

A maioria das cultivares de sorgo tipo III possuem taninos condensados de alto peso molecular (polímeros) com grau de polimerização maior que 10 (Awika et al., 2003; Barros et al., 2014) e possuem a maior capacidade antioxidante *in vitro* e *in vivo* comparados com compostos fenólicos simples (Hagerman et al., 1998; Tian et al., 2012). Essa elevada capacidade antioxidante dos taninos do sorgo é a principal responsável pelas suas propriedades anticarcinogênicas e anti-inflamatórias (Huang et al., 2010). Os taninos presentes em extratos fenólicos de sorgo inibiram, de forma significativa, células de câncer de esôfago e de cólon (Awika et al., 2009) e também inibiram as enzimas aromatase, alvo no tratamento de câncer de mama, e hialuronidase, enzima associada à inflamação (Hargrove et al., 2011; Bralley et al., 2008), e reduziram a expressão de ciclooxigenase-2 (COX-2), com menor formação de edema (Burdette et al., 2010; Shim et al., 2013), o que sugere a ação dos taninos no controle da inflamação.

Além das propriedades antioxidantes, os taninos condensados de alto peso molecular interagem com mais facilidade com proteínas e amido, reduzindo a digestibilidade destes nutrientes (Hagerman et al., 1992; Davis; Hosene 1979; Barros et al., 2012, 2014). Esse efeito pode ser benéfico no controle da obesidade e do diabetes. Os taninos condensados presentes no sorgo, principalmente os poliméricos, interagem fortemente com a amilose, formando amido resistente (Barros et al., 2012, 2014). Os taninos poliméricos também podem interagir com a α -amilase, reduzindo a digestibilidade do amido e proporcionando menor índice glicêmico (Mkandawire et al., 2013).

Os taninos condensados de alto peso molecular, livres ou complexados com proteínas ou carboidratos, não são digeridos e absorvidos pelo organismo humano. Ao atingir o intestino grosso eles podem proporcionar um ambiente antioxidante ao reduzir o estresse oxidativo, ou podem ser fermentados, produzindo ácidos graxos de cadeia curta e compostos de menor peso molecular os quais proporcionam benefícios à saúde (Saura-Calixto et al., 2010; Taberero et al., 2011; Tian et al., 2012).

Entretanto, a biodisponibilidade dos taninos do sorgo pode ser melhorada de forma significativa por meio do processamento dos alimentos. O tratamento térmico pode despolimerizar os taninos condensados e produzir monômeros (catequinas) e oligômeros, sem alterar sua concentração total, aumentando sua biodisponibilidade (Awika et al., 2003; Barros et al., 2012).

Portanto, os grãos, a farinha e o farelo de sorgo contendo taninos podem ser usados como ingredientes na produção de alimentos funcionais sem glúten, com menor densidade calórica e maior capacidade antioxidante.

3-Deoxiantocianinas (3-DXAS)

Antocianinas são flavonoides, solúveis em água, que possuem significativa capacidade antioxidante, anti-inflamatória e anticarcinogênica (Awika; Rooney 2004). As antocianinas do sorgo são as raras 3-deoxiantocianidinas (3-DXAs), que correspondem até 79% dos flavonoides de cultivares específicas de sorgo, sendo a luteolinidina e a apigeninidina as principais (Dykes; Rooney, 2006; Taleon et al., 2012). As 3-DXAs são mais estáveis a variações de pH e de temperatura do que as antocianinas mais comuns, presentes em frutas e hortaliças (Awika et al., 2004a, 2004b; Yang et al., 2014). Essa propriedade possibilita a exploração comercial das 3-DXAs do sorgo não só como antioxidante, mas também como corante natural para alimentos.

A concentração das 3-DXAs se correlaciona com a cor do pericarpo dos grãos de sorgo e com a sua capacidade antioxidante (Awika; Rooney, 2004). As cultivares com pericarpo preto possuem de 3 a 4 vezes mais dessas antocianinas (5,4 a 6,1 mg/g) que aquelas com pericarpo vermelho e marrom (1,6 a 2,8 mg/g) (Awika et al., 2004b). O farelo de algumas cultivares de sorgo com pericarpo preto possui concentrações de antocianinas totais superiores ao de outros cereais e frutas (Awika; Rooney 2004; Dykes et al., 2009).

O potencial das 3-deoxiantocianinas do sorgo no controle das doenças crônicas não transmissíveis vem sendo investigado. Essas antocianinas são mais citotóxicas às células cancerígenas quando comparadas com as de frutas e hortaliças (Shih et al., 2007). Elas aumentam a atividade de enzimas de fase II, elevando a atividade da NADH:quinona oxiredutase (NQO), as quais são facilitadoras da eliminação de carcinógenos endógenos (Awika et al., 2009; Yang et al., 2009; Shih et al., 2007). Além disso, as 3-DXAs são as principais responsáveis pela inibição da secreção dos fatores pró-inflamatórios interleucina-1 β (IL-1 β), fator de necrose tumoral- α (TNF- α) e de óxido nítrico em células mononucleares de humanos (Burdette et al., 2010).

Portanto, existe um grande potencial do uso de sorgo rico em 3-deoxiantocianinas em produtos alimentícios, por causa das propriedades benéficas para a saúde, além da possibilidade de sua extração e uso como corante natural para alimentos, o que poderia substituir ou complementar o uso de corantes artificiais e de outros corantes naturais.

Flavonas, Flavanonas e Ácidos Fenólicos

Além dos taninos e das 3-deoxiantocianinas, as flavonas e as flavanonas são outros compostos fenólicos pertencentes ao grupo dos flavonoides, encontrados no sorgo. As principais flavonas do sorgo são a luteolina e a apigenina, e a soma de suas concentrações varia de 0 a 386 $\mu\text{g/g}$ (Dykes et al., 2009, 2011; Cardoso et al., 2014). As principais flavanonas do sorgo são a naringenina e o eriodictiol (Dykes et al., 2009, 2011; Cardoso et al., 2014; Paiva et al., 2018). As cultivares de sorgo com maiores concentrações de flavanonas (474 a 1.780 $\mu\text{g/g}$) possuem pericarpo amarelo-laranja (Dykes et al., 2011).

Ácidos Fenólicos

Outros compostos fenólicos presentes no sorgo são os ácidos fenólicos, que são encontrados em todas as cultivares desse cereal. A concentração de ácidos fenólicos totais em algumas variedades de sorgo varia entre 135,5 e 479,4 $\mu\text{g/g}$ (Afify et al., 2012; Chiremba et al., 2012). Os principais ácidos fenólicos encontrados no sorgo são os ácidos protocatecuico (150,3-178,2 $\mu\text{g/g}$) e ferúlico (120,5- 173,5 $\mu\text{g/g}$), porém, outros ácidos fenólicos tais quais p-cumárico (41,9-71,9 $\mu\text{g/g}$), siríngico (15,7-17,5 $\mu\text{g/g}$), vanílico (15,4-23,4 $\mu\text{g/g}$), gálico (14,8-21,5 $\mu\text{g/g}$), cafeico (13,6- 20,8 $\mu\text{g/g}$), cinâmico (9,8-15,0 $\mu\text{g/g}$) e p-hidroxibenzoico (6,1-16,4 $\mu\text{g/g}$) foram encontrados em pequenas quantidades no sorgo (Afify et al., 2012; Svensson et al., 2010). Esses ácidos fenólicos exibem alta capacidade antioxidante *in vitro* e podem promover benefícios à saúde humana (Kamath et al., 2004).

Os ácidos fenólicos presentes no vinho, nas frutas e nas hortaliças possuem uma boa biodisponibilidade, pois a maioria está livre na matriz alimentar (Hole et al., 2012). Porém, os ácidos fenólicos em cereais, incluindo o sorgo, estão em sua maioria complexados com compostos da parede celular (arabinoxilanas e lignina) e não são hidrolisados pelas enzimas digestivas, proporcionando baixa biodisponibilidade (Adom; Liu, 2002; Saura-Calixto et al., 2010; Abdel-Aal et al., 2012; Dykes; Rooney 2006).

Fibra Alimentar

As fibras alimentares são conhecidas por trazerem vários benefícios para a saúde humana, como prevenção do câncer de cólon e da obesidade, e são coadjuvantes no controle dos níveis de lipídios e de glicose séricos. De acordo com Martino et al. (2012), os grãos integrais de sorgo são excelentes fontes de fibra, podendo contribuir com até 50% da RDA. Esses autores obtiveram entre 9,1% e 15,1% de fibras alimentares totais em oito genótipos de sorgo, como demonstrado na Tabela 2. As fibras insolúveis correspondem à maior proporção (75-90%), principalmente as arabinoxilanas, e as fibras solúveis, incluindo o amido resistente, somam entre 10% e 25% das fibras totais (Martino et al., 2012; Taylor; Emmambux, 2010).

Amido Resistente

O amido é o composto em maior concentração nos cereais e a principal fonte de calorias em alimentos formulados com cereais. O sorgo é conhecido por possuir a menor digestibilidade de amido entre os cereais por causa da forte associação entre os grânulos e as moléculas de amido com as proteínas (kaferinas) (Rooney; Pflugfelder 1986; Zhang; Hamaker, 1998). A maioria dos grânulos de amido é digerida lentamente (30-66,2%) e o restante é digerido rapidamente (15,3-26,6%) ou não é digerido (16,7-43,2%) (Mkandawire et al., 2013; Sang et al., 2008). Essa baixa digestibilidade se mantém mesmo após a cocção do amido de sorgo (Zhang; Hamaker, 1998). De forma geral, a baixa digestibilidade do amido de sorgo é vista como um aspecto negativo (Serna-Saldivar; Rooney, 1995) para alimentação animal. Por outro lado, a ingestão de alimentos contendo poucas calorias é benéfica para alimentação humana, pois eles podem ajudar na prevenção de doenças crônicas não transmissíveis como obesidade e o diabetes.

Além disso, os taninos condensados (proantocianidinas), especialmente os de alto peso molecular, interagem com o amido, formando amido resistente naturalmente modificado (Hagerman et al., 1992; Davis; Hosoney 1979; Barros et al., 2012, 2014).

O amido resistente, por não ser digerido no intestino delgado, torna-se disponível como substrato para fermentação pelas bactérias anaeróbicas do cólon (Jenkins et al., 1998) compartilhando, dessa forma, muitas das características e benefícios atribuídos à fibra alimentar no trato gastrointestinal (Berry, 1986; Muir; O’dea, 1992). Têm sido atribuídos, ao amido resistente, efeitos fisiológicos benéficos, como redução da glicemia pós-prandial (desejável no diabetes) e dos níveis de LDL e de triglicerídeos plasmáticos (Walter et al., 2005). Adicionalmente, o amido resistente contribui para o aumento do volume fecal, a modificação da microflora do cólon, o aumento da excreção fecal de nitrogênio e, possivelmente, a redução do risco de câncer de cólon (Jenkins et al., 1998).

Apesar das evidências indicando que o amido resistente é fisiologicamente benéfico, os níveis de consumo ainda permanecem relativamente baixos (Brighenti et al., 1998; Johnson; Gee, 1996; Voragen, 1998). Isto pode ser atribuído a vários fatores, incluindo a disponibilidade limitada de fontes adequadas desses carboidratos. Assim, pesquisas com o objetivo de identificar novas fontes de amido resistente são necessárias. Platel e Shurpalekar (1994) determinaram os teores de amido resistente em

alguns cereais, leguminosas e hortaliças após o processamento e relataram que, entre os alimentos estudados, o sorgo apresentou elevada concentração desse composto. Saravanabavan et al. (2013) encontraram valores entre 3,4 e 4,3 g/100 g de RS em três variedades de sorgo (pop, maldandi e vermelho) que não foram processadas. Ragaee et al. (2006) relataram conteúdo de RS de $1,77 \pm 0,02$ g/100 g em grãos de sorgo. Khan et al. (2013) observaram teores de RS de $0,42 \pm 0,06$ g/100 g em farinha de trigo; $2,21 \pm 0,06$ g/100 g em farinha de sorgo branco e de $2,95 \pm 0,15$ g/100 g de farinha de sorgo vermelho, indicando que a porção de amido resistente de sorgo é superior à do trigo.

Melhoramento Genético de Sorgo Visando Alimentação Humana

Uma grande variabilidade genética tem sido observada no que tange às concentrações de nutrientes e de compostos bioativos entre diferentes genótipos de sorgo (Reddy; D'Souza, 1994; Queiroz et al., 2015; Paiva et al., 2017; Cardoso et al., 2015), o que evidencia um potencial para exploração pelos programas de Melhoramento Genético para o desenvolvimento de cultivares mais nutritivas, visando a utilização na alimentação humana. Nesse sentido, Queiroz et al. (2015) avaliaram 100 genótipos de sorgo em condições normais de cultivo e sob estresses hídrico e encontraram efeitos significativos tanto do genótipo, quanto do ambiente e da interação entre eles. Os teores de carboidratos, proteínas, lipídios, fibras e cinzas apresentaram, respectivamente, as seguintes variações: 55,2-75,2%; 8,6-18,9%; 1,7-4,9%; 9,3-25,2% e 1,1-2,4%, nos dois ambientes. Os melhores resultados foram identificados nos genótipos BR007B, SC59 e SC1033 para carboidratos, SC325, SC320 e SC124 para proteínas, SC35, N268B e Lian Tang Ai para lipídios, SC673, SC467 e (SN142) REDBINE SA386-60 (ASA N98) para fibra e SC224, SC566, SC467 e SC1356 para cinzas. Os teores de lipídios não foram afetados pelo estresse hídrico, porém, carboidratos, proteínas e cinzas foram menores, e a fibra foi maior nas amostras cultivadas nesse ambiente. Os genótipos listados acima têm grande potencial para desenvolver cultivares com alto valor nutricional, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, podendo contribuir para a segurança alimentar das populações desses locais.

Paiva et al. (2017) também encontraram grande variação nos teores de minerais desses mesmos genótipos, avaliados nos mesmos ambientes do trabalho supracitado. Foi detectado um efeito do estresse hídrico para os

teores de P, K, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, cujas médias foram, respectivamente, 3,67; 4,08; 1,76; 1,10 g/kg e 3,25; 31,94; 19,75; 22,020 mg/kg no ambiente sem estresse hídrico e 2,17; 3,72; 1,26; 1,09 g/kg; 3,08; 29,54; e 12,56; 22,02 e 22,40 mg/kg no ambiente com estresse hídrico. Nenhum efeito do estresse hídrico foi observado para o Ca (0,17 g/kg). Aproximadamente 29% das 100 amostras de sorgo analisadas foram classificadas como excelentes fontes de Fe e 47% de Zn. Os genótipos SC320, SC655, SC53 e SC414_12 mostraram grande potencial para uso em projetos de biofortificação.

Teixeira et al. (2016) avaliaram o teor de amido resistente (AR) em 49 genótipos de sorgo, bem como os efeitos do tratamento térmico por calor seco e úmido sobre o grão e a farinha de dois genótipos de sorgo. Os resultados mostraram grande variação no conteúdo de AR nos vários genótipos analisados, entre 0,31 e 65,66 g/100 g em base seca. As linhagens SC 59 e (SSN76) FC6608 RED KAFIR BAZINE (ASA N23), com teores médios de aproximadamente 65 g/100 g, foram as melhores, apresentando grande potencial para o desenvolvimento de cultivares de sorgo com alto teor de AR, com efeito positivo na saúde humana. O teor de AR das linhagens supracitadas foi significativamente superior aos teores encontrados por Saravanabavan et al. (2013) e por Ragaee et al. (2006) que foram no máximo 4,3 g/100g de amostra, comprovando o relevante papel do melhoramento genético na busca por genótipos superiores. Teixeira et al. (2016) observaram, também, que o calor seco causa pequenas perdas no conteúdo de AR com retenções de até 97,19% deste composto em grão e farinha de sorgo, enquanto o calor úmido retém no máximo 6,98 do AR. Portanto, o uso de calor seco é uma alternativa melhor para a preservação do AR em grãos e farinha de sorgo tratados termicamente.

Cardoso et al. (2015) avaliaram os teores de vitamina E e de carotenoides em 100 genótipos de sorgo, bem como a estabilidade desses compostos em três genótipos submetidos ao processamento (forno/moagem e extrusão). O sorgo apresentou alta variabilidade no conteúdo de vitamina E (280,7 - 2.962,4 µg/100g; média de 1.888,0 µg/100g) e 24% dos genótipos foram considerados fontes dessa vitamina. O γ e o α -tocoferol foram os principais isômeros da vitamina E, correspondendo a 61% e 22% do total, respectivamente. O total de carotenoides foi baixo em todos os genótipos de sorgo avaliados (2,12 - 85,46 µg/100g; média de 22,29 µg/100g). A zeaxantina foi o principal carotenoide, representando 68,8% do total. Quanto ao processamento, os teores totais de vitamina E e de α -tocoferol

diminuíram após a extrusão, mas aumentaram após o processamento em forno convencional. Os carotenoides do sorgo foram sensíveis à extrusão e ao processamento em forno.

Outros estudos referentes aos teores de 3-deoxiantocianinas, flavonas, flavanonas, amido total, amilose e amilopectina em mais de 200 genótipos de sorgo estão em andamento na Embrapa Milho e Sorgo, a fim de compor um banco de dados que possa dar suporte a programas de melhoramento genético de sorgo que visem o desenvolvimento de cultivares de sorgo com características nutricionais e funcionais mais adequadas para uso na alimentação humana.

Considerações Finais

O sorgo é um cereal que não possui as proteínas formadoras do glúten e é considerado uma ótima fonte de compostos fenólicos e de fibra alimentar. O tipo e a concentração dos compostos bioativos, especialmente as 3-deoxiantocianinas e os taninos, e o teor de amido resistente contido em alguns genótipos de sorgo desempenham efeito modulador em processos relacionados a doenças crônicas não transmissíveis, além de favorecerem seu uso na produção de alimentos funcionais. No entanto, a concentração de nutrientes e desses compostos no sorgo depende do genótipo e do ambiente onde o cereal é cultivado. Por isso, o melhoramento genético de sorgo voltado para o desenvolvimento de cultivares comerciais que contenham maiores teores desses compostos é de grande relevância, pois pode impactar a nutrição e a saúde humana.

Referências

ABDEL-AAL, E. S. M.; CHOO, T. M.; DHILLON, S.; RABALSKI, I. Free and bound phenolic acids and total phenolics in black, blue, and yellow barley and their contribution to free radical scavenging capacity. **Cereal Chemistry Journal**, v. 89, n. 4, p. 198-204, 2012.

ABDELGHAFOR, R.; MUSTAFA, A.; IBRAHIM, A.; KRISHNAN, P. G. Quality of bread from composite flour of sorghum and hard white winter wheat. **Advances Journal of Food Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 9-15, 2011.

ABOUBACAR, A.; YAZICI, N.; HAMAKER, B. R. Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 41, n. 6, p. 698-703, 2006.

ADOM, K. K.; LIU, R. H. Antioxidant activity of grains. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 21, p. 6182-6187, 2002.

AFIFY, A. E.-M. M. R.; EL-BELTAGI, H. S.; EL-SALAM, S. M. A.; OMRAN, A. A. Biochemical changes in phenols, flavonoids, tannins, vitamin E, β -carotene and antioxidant activity during soaking of three white sorghum varieties. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 2, n. 3, p. 203-209, 2012.

ANGLANI, C. Sorghum for human food: a review. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 52, p. 85-89, 1998.

ANUNCIAÇÃO, P. C.; CARDOSO, L. de M.; GOMES, J. V. P.; DELLA LUCIA, C. M.; CARVALHO, C. W. P. de; GALDEANO, M. C.; QUEIROZ, V. A. V.; ALFENAS, R. de C. G.; MARTINO, H. S. D.; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M. Comparing sorghum and wheat whole grain breakfast cereals: sensorial acceptance and bioactive compound content. **Food Chemistry**, v. 221, p. 984-989, 2017.

ANUNCIAÇÃO, P. C.; CARDOSO, L. de M.; ALFENAS, R. de C. G.; QUEIROZ, V. A. V.; CARVALHO, C. W. P. de; MARTINO, H. S. D.; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M. Extruded sorghum consumption associated with a caloric restricted diet reduces body fat in over weight men: a randomized controlled trial. **Food Research International**, v. 110, p. 693-700, 2019.

ARBEX, P. M.; MOREIRA, M. E. de C.; TOLEDO, R. C. L.; CARDOSO, L. de M.; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M.; BENJAMIN, L. dos A.; LICURSI, L.; CARVALHO, C. W. P. de; QUEIROZ, V. A. V.; MARTINO, H. S. D. Extruded sorghum flour (*Sorghum bicolor* L.) modulate adiposity and inflammation in high fat diet-induced obese rats. **Journal of Functional Foods**, v. 42, p. 346-355, 2018.

ASIF, M.; ROONEY, L. W.; ACOSTA-SANCHEZ, D.; MACK, C. A.; RIAZ, M. N. Uses of sorghum grain in gluten-free products. **Cereal Foods World**, v. 55, n. 6, p. 285-291, 2010.

AWIKA, J. M. **Antioxidant properties of sorghum**. 2003. 236 f. Dissertação (Mestrado) - Texas A&M University, College Station, 2003.

AWIKA, J. M.; DYKES, L.; GU, L.; ROONEY, L. W.; PRIOR, R. L. Processing of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products alters procyanidin oligomer and polymer distribution and content. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 18, p. 5516-5521, 2003.

AWIKA, J. M.; MCDONOUGH, C. M.; ROONEY, L. W. Decorticating sorghum to concentrate healthy phytochemicals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 16, p. 6230-6234, 2005.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. **Phytochemistry**, v. 65, n. 9, p. 1199-1221, 2004.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Anthocyanins from black sorghum and their antioxidant properties. **Food Chemistry**, v. 90, n. 1/2, p. 293-301, 2004a.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Properties of 3-deoxyanthocyanins from sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 52, n. 14, p. 4388-4394, 2004b.

AWIKA, J. M.; YANG, L.; BROWNING, J. D.; FARAJ, A. Comparative antioxidant, antiproliferative and phase II enzyme inducing potential of sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties. **LWT - Food Science Technology**, v. 42, n. 6, p. 1041-1046, 2009.

BARROS, F.; AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on in vitro starch digestibility. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 46, p. 11609-11617, 2012.

BARROS, F.; AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Effect of molecular weight profile of sorghum proanthocyanidins on resistant starch formation.

Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 94, n. 6, p. 1212-1217, 2014.

BERRY, C. S. Resistant starch: formation and measurement of starch that survives exhaustive digestion with amylolytic enzymes during the determination of dietary fibre. **Journal of Cereal Science**, v. 4, n. 4, p. 301-314, 1986.

BRALLEY, E.; GREENSPAN, P.; HARGROVE, J. L.; HARTLE, D. K. Inhibition of hyaluronidase activity by select sorghum brans. **Journal of Medicinal Food**, v. 11, n. 2, p. 307-312, 2008.

BRIGHENTI, F.; CASIRAGHI, C. M.; BAGGIO, C. Resistant starch in the Italian diet. **British Journal of Nutrition**, v. 80, n. 4, p. 333-341, 1998.

BURDETTE, A.; GARNER, P. L.; MAYER, E. P.; HARGROVE, J. L.; HARTLE, D. K.; GREENSPAN, P. Anti-Inflammatory activity of select sorghum (*Sorghum bicolor*) brans. **Journal of Medicinal Food**, v. 13, n. 4, p. 879-887, 2010.

CARDOSO, L. de M.; MONTINI, T. A.; PINHEIRO, S. S.; QUEIROZ, V. A. V.; PINHEIRO SANT'ANA, H. M.; MARTINO, H. S. D.; MOREIRA, A. V. B. Effects of processing with dry heat and wet heat on the antioxidant profile of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Food Chemistry**, v. 152, p. 201-217, 2014.

CARDOSO, L. de M.; PINHEIRO, S. S.; SILVA, L. L. da; MENEZES, C. B. de; TARDIN, F. D.; QUEIROZ, V. A.; MARTINO, H. S. D.; PINHEIRO-SANT'ANA, H. M. Tocochromanols and carotenoids in sorghum (*Sorghum bicolor* L.): diversity and stability to the heat treatment. **Food Chemistry**, v. 172, p. 900-908, 2015.

CARR, T. P.; WELLER, C. L.; SCHLEGEL, V. L.; CUPPETT, S. L.; GUDERIAN, D. M.; JOHNSON, K. R. Grain sorghum lipid extract reduces cholesterol absorption and plasma non-HDL cholesterol concentration in hamsters. **The Journal of Nutrition**, v. 135, n. 9, p. 2236-2240, 2005.

CHIREMBA, C.; TAYLOR, J. R. N.; ROONEY, L. W.; BETA, T. Phenolic acid content of sorghum and maize cultivars varying in hardness. **Food Chemistry**, v. 134, n. 1, p. 81-88, 2012.

DAVIS, A. B.; HOSENEY, R. C. Grain sorghum condensed tannins. I. Isolation, estimation, and selective adsorption by starch. **Cereal Chemistry**, v. 56, n. 4, p. 310-314, 1979.

DEVI, N. L.; SHOBHA, S.; TANG, X.; SHAUR, S. A.; DOGAN, H.; ALAVI, S. Development of protein-rich sorghum-based expanded snacks using extrusion technology. **International Journal of Food Properties**, v. 16, n. 2, p. 263-276, 2013.

DICKO, M. H.; GRUPPEN, H.; TRAORÉ, A. S.; VORAGEN, A. G. J.; BERKEL, W. J. H. Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 5, p. 384-395, 2006.

DLAMINI, N. R.; TAYLOR, J. R. N.; ROONEY, L. W. The effect of sorghum type and processing on the antioxidant properties of African sorghum-based foods. **Food Chemistry**, v. 105, n. 4, p. 1412-1419, 2007.

DYKES, L.; PETERSON, G. C.; ROONEY, W. L.; ROONEY, L. W. Flavonoid composition of lemon-yellow sorghum genotypes. **Food Chemistry**, v. 128, n. 1, p. 173-179, 2011.

DYKES, L.; ROONEY, L. W. Sorghum and millet phenols and antioxidants. **Journal of Cereal Science**, v. 44, n. 3, p. 236-251, 2006.

DYKES, L.; ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D.; ROONEY, W. L. Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 17, p. 6813-6818, 2005.

DYKES, L.; SEITZ, L. M.; ROONEY, W. L.; ROONEY, L. W. Flavonoid composition of red sorghum genotypes. **Food Chemistry**, v. 116, n. 1, p. 313-317, 2009.

FERREIRA, S. M. R.; LUPARELLI, P. C.; SCHIEFERDECKER, M. E. M.; VILELA, R. M. Cookies sem glúten a partir da farinha de sorgo. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, v. 59, n. 4, p. 433-440, 2009.

GLEW, R. H.; VANDERJAGT, D. J.; LOCKETT, C.; GRIVETTI, L. E.; SMITH, G. C.; PASTUSZYN, A.; MILLSON, M. Amino acid, fatty acid, and mineral composition of 24 indigenous plants of Burkina Faso. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 10, n. 3, p. 205-217, 1997.

GONZÁLEZ, A. J. P. **Specialty sorghums in direct-expansion extrusion**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Texas A&M University, College Station, 2005.

HAGER, A.-S.; TAYLOR, J. P.; WATERS, D. M.; ARENDT, E. K. Gluten free beer: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 36, n. 1, p. 44-54, 2014.

HAGERMAN, A. E.; BUTLER, L. G. Condensed tannin purification and characterization of tannin-associated proteins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 28, n. 5, p. 947-952, 1980.

HAGERMAN, A. E.; RIEDL, K. M.; JONES, G. A.; SOVIK, K. N.; RITCHARD, N. T.; HARTZFELD, P. W.; RIECHEL, T. L. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, n. 5, p. 1887-1892, 1998.

HAGERMAN, A. E.; ROBBINS, C. T.; WEERASURIYA, Y.; WILSON, T. C.; MCCARTHUR, C. Tannin chemistry in relation to digestion. **Journal of Range Management Archives**, v. 45, n. 1, p. 57-62, 1992.

HAHN, D. H.; ROONEY, L. W. Effect of genotype on tannins and phenols of sorghum. **Cereal Chemistry**, v. 63, n. 1, p. 4-8, 1986.

HARGROVE, J. L.; GREENSPAN, P.; HARTLE, D. K.; DOWD, C. Inhibition of aromatase and α -Amylase by flavonoids and proanthocyanidins from sorghum bicolor bran extracts. **Journal of Medicinal Food**, v. 14, n. 7/8, p. 799-807, 2011.

HOLE, A. S.; RUD, I.; GRIMMER, S.; SIGL, S.; NARVHUS, J.; SAHLSTRØM, S. Improved bioavailability of dietary phenolic acids in whole grain barley and oat groat following fermentation with probiotic *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus johnsonii*, and *Lactobacillus reuteri*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 25, p. 6369-6375, 2012.

HUANG, W-Y.; CAI, Y.-Z.; ZHANG, Y. Natural phenolic compounds from medicinal herbs and dietary plants: Potential use for cancer prevention. **Nutrition and Cancer**, v. 62, n. 1, p. 1-20, 2010.

HUGO, L. F.; ROONEY, L. W.; TAYLOR, J. R. Fermented sorghum as a functional ingredient in composite breads. **Cereal Chemistry**, v. 80, n. 5, p. 495-499, 2003.

JADHAV, M. V.; ANNAPURE, U. S. Effect of extrusion process parameters and particle size of sorghum flour on expanded snacks prepared using different varieties of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). **Journal of Agricultural Science and Technology B**, v. 3, p. 71-85, 2013.

JENKINS, D. J. A.; VUKSAN, V.; KENDALL, C. W. C.; WÜRSCH, P.; JEFFCOAT, R.; WARING, S.; MEHLING, C. C.; VIDGEN, E.; AUGUSTIN, L. S. A.; WONG, E. Physiological effects of resistant starches on fecal bulk, short chain fatty acids, blood lipids and glycemic index. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 17, n. 6, p. 609-616, 1998.

JOHNSON, I. T.; GEE, J. M. Resistant starch. **Nutrition and Food Science**, v. 1, p. 20-23, 1996.

KAMATH, V. G.; CHANDRASHEKAR, A.; RAJINI, P. S. Antiradical properties of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) flour extracts. **Journal of Cereal Science**, v. 40, n. 3, p. 283-288, 2004.

KAYODÉ, A. P. P.; HOUNHOUGAN, J. D.; NOUT, M. J. R. Impact of brewing process operations on phytate, phenolic compounds and in vitro solubility of iron and zinc in opaque sorghum beer. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 834-841, 2007.

KHAN, I.; YOUSIF, A.; JOHNSON, S. K.; GAMLATHA, S. Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 578-586, 2013.

LAKSHMI, K. B.; VIMALA, V. Hypoglycemic effect of selected sorghum recipes. **Nutrition Research**, v. 16, p. 1651-1658, 1996.

LIU, L.; HERALD, T. J.; WANG, D.; WILSON, J. D.; BEAN, S. R.; ARAMOUNI, F. M. Characterization of sorghum grain and evaluation of sorghum flour in a Chinese egg noodle system. **Journal of Cereal Science**, v. 55, n. 1, p. 31-36, 2012.

LOPES, R. de C. S. O.; LIMA, S. L. L. de; SILVA, B. F. da; TOLEDO, R. C. L.; MOREIRA, M. E de C.; ANUNCIACÃO, P. C. de; WALTER, E. H. M.; CARVALHO, C. W. P. de; QUEIROZ, V. A. V.; RIBEIRO, A. Q.; MARTINO, H. S. D. Evaluation of the health benefits of consumption of extruded tannin sorghum with unfermented probiotic milk in individuals with chronic kidney disease. **Food Research International**, v. 107, p. 629-638, 2018.

LOPES, R. de C. S. O.; THEODORO, J. M. V.; SILVA, B. P. da; QUEIROZ, V. A. V.; MOREIRA, M. E. de C.; MANTOVANI, H. C.; HERMSDORFF, H. H.; MARTINO, H. S. D. Symbiotic meal decreases uremic toxins in hemodialysis individuals: a placebo-controlled trial. **Food Research International**, v. 116, p. 241-248, 2019.

LYUMUGABE, F.; UYISENGA, J. P.; SONGA, E. B.; THONART, P. Production of traditional sorghum beer “ikigage” using *saccharomyces cerevisiae*, *lactobacillus fermentum* and *issatckenkia orientalis* as starter cultures. **Food and Nutrition Sciences**, v. 5, n. 6, p. 507-515, 2014.

MARTINO, H. S. D.; TOMAZ, P. A.; MORAES, E. A.; CONCEIÇÃO, L. L.; OLIVEIRA, D. S.; QUEIROZ, V. A. V.; RODRIGUES, J. A. S.; PIROZI, M. R.; PINHEIRO-SANT’ANA, H. M.; RIBEIRO, M. R. Chemical characterization and size distribution of sorghum genotypes for human consumption. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 71, n. 2, p. 337-344, 2012.

- MKANDAWIRE, N. L.; KAUFMAN, R. C.; BEAN, S. R.; WELLER, C. L.; JACKSON, D. S.; ROSE, D. J. Effects of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) tannins on α -amylase activity and in vitro digestibility of starch in raw and processed flours. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 18, p. 4448-4454, 2013.
- MORAES, E. A.; NATAL, D. I. G.; QUEIROZ, V. A. V.; SCHAFFERT, R. E.; CECON, P. R.; DE PAULA, S. O.; BENJAMIM, L. D. A.; RIBEIRO, S. M. R.; MARTINO, H. S. D. Sorghum genotype may reduce low-grade inflammatory response and oxidative stress and maintains jejunum morphology of rats fed a hyperlipidic diet. **Food Research International**, v. 49, n. 1, p. 553-559, 2012.
- MORAES, E. A.; MARINELI, R. da S.; LENQUISTE, S. A.; QUEIROZ, V. A. V.; CAMARGO, R. L.; BORCK, P. C.; CARNEIRO, E. M.; MARÓSTICA JÚNIOR, M. R. Whole sorghum flour improves glucose tolerance, insulin resistance and preserved pancreatic islets function in obesity diet-induced rats. **Journal of Functional Foods**, v. 45, p. 530-540, 2018.
- MUIR, J. G.; O'DEA, K. Measurement of resistant starch: factors affecting the amount of starch escaping digestion in vitro. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 56, n. 1, p. 123-127, 1992.
- PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; RODRIGUES, J. A. D. S. Estudos sensoriais para determinação da vida de prateleira de barra de cereais com pipoca de sorgo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 3, p. 302-311, 2012.
- PAIVA, C. L.; EVANGELISTA, W. P.; QUEIROZ, V. A. V.; GLORIA, M. B. A. Bioactive amines in sorghum: method optimisation and influence of line, tannin and hydric stress. **Food Chemistry**, v. 173, p. 224-230, 2015.
- PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; SIMEONE, M. L. F.; SCHAFFERT, R. E.; OLIVEIRA, A. C. de; SILVA, C. S. da. Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. **Food Chemistry**, v. 214, p. 400-405, 2017.

PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; GARCIA, M. A. V. T.; CARVALHO, C. W. P. de. Acceptability and study of shelf life of gluten free cereal bar with popped and extruded sorghum based on a consumer acceptability. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 52-58, 2018.

PAIVA, C. L.; QUEIROZ, V. A. V.; GARCIA, M. A. V. T. Características tecnológicas, sensoriais e químicas de massas secas sem glúten à base de farinhas de sorgo e milho. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, e2018095, 2019.

PLATEL, K.; SHURPALEKAR, K. S. Resistant starch content of Indian foods. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 45, n. 1, p. 91-95, 1994.

PRICE, M. L.; VAN SCOYOC, S.; BUTLER, L. G. A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 26, n. 5, p. 1214-1218, 1978.

QUEIROZ, V. A. V.; MORAES, E. A.; SCHAFFERT, R. E.; MOREIRA, A. V.; RIBEIRO, S. M. R.; MARTINO, H. S. D. Potencial funcional e tecnologia de processamento do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), na alimentação humana. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 3, p. 180-195, 2011.

QUEIROZ, V. A. V.; CARNEIRO, H. L.; DELIZA, R.; RODRIGUES, J. A. S.; VASCONCELLOS, J. H. de; TARDIN, F. D.; QUEIROZ, L. R. Genótipos de sorgo para produção de barra de cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 287-293, fev. 2012.

QUEIROZ, V. A. V.; SILVA, C. S. da; MENEZES, C. B. de; SCHAFFERT, R. E.; GUIMARÃES, F. F. M.; GUIMARÃES, L. J. M.; GUIMARÃES, P. E. de O.; TARDIN, F. D. Nutritional composition of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes cultivated without and with water stress. **Journal of Cereal Science**, v. 65, p. 103-111, 2015.

QUEIROZ, V. A. V.; AGUIAR, A. da S.; MENEZES, C. B. de; CARVALHO, C. W. P. de; PAIVA, C. L.; FONSECA, P. C.; CONCEIÇÃO, R. R. P. da. A low calorie and nutritive sorghum powdered drink mix: influence of tannin on the sensorial and functional properties. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 43-49, 2018.

RAGAE, S.; ABDEL-AAL, E. M.; NOAMAN, M. Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use. **Food Chemistry**, v. 98, n. 1, p. 32-38, 2006.

RATNAVATHI, C.; PATIL, J. Sorghum utilization as food. **Journal of Nutrition and Food Sciences**, v. 4, n. 1, 100247, 2013.

REDDY, C. A.; D'SOUZA, T. M. Physiology and molecular biology of the lignin peroxidases of *Phanerochaete chrysosporium*. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 13, n. 2/3, p. 137-152, 1994.

ROONEY, L.W.; PFLUGFELDER, R. L. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. **Journal of Animal Science**, v. 63, n. 5, p. 1607-1623, 1986.

ROONEY, L. W.; AWIKA, J. M. Overview of products and health benefits of specialty sorghums. **Cereal Foods World**, v. 50, n. 3, p. 109-115, 2005.

SAMPAIO, C. R. P.; FERREIRA, S. M. R.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Perfil sensorial e aceitabilidade de barras de cereais fortificadas com ferro. **Alimentos e Nutrição**, v. 20, n. 1, p. 95-106, 2009.

SARAVANABAVAN, S. N.; SHIVANNA, M. M.; BHATTACHARYA, S. Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. **Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 387-392, 2013.

SAURA-CALIXTO, F.; PEREZ-JIMENEZ, J.; TOURINO, S.; SERRANO, J.; FUGUET, E.; TORRES, J. L.; GONI, I. Proanthocyanidin metabolites associated with dietary fibre from *in vitro* colonic fermentation and proanthocyanidin metabolites in human plasma. **Molecular Nutrition and Food Research**, v. 54, n. 7, p. 939-946, 2010.

SANG, Y.; BEAN, S.; SEIB, P. A.; PEDERSEN, J.; SHI, Y.-C. Structure and functional properties of sorghum starches differing in amylose content. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 15, p. 6680-6685, 2008.

SCHOBER, T. J.; BEAN, S. R.; BOYLE, D. L. Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: biochemical, rheological, and microstructural background. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 13, p. 5137-5146, 2007.

SCHOBER, T. J.; MESSERSCHMIDT, M.; BEAN, S. R.; PARK, S.-H.; ARENDT, E. K. Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. **Cereal Chemistry**, v. 82, n. 4, p. 394-404, 2005.

SERNA-SALDIVAR, S.; ROONEY, L. W. Structure and chemistry of sorghum and millets. In: DENDY, D. A. V. (ed.). **Structure and chemistry of sorghum and millets**. St. Paul: AACC, 1995. p. 69-124.

SERREM, C. A.; KOCK, H. L. D.; TAYLOR, J. R. N. Nutritional quality, sensory quality and consumer acceptability of sorghum and bread wheat biscuits fortified with defatted soy flour. **International Journal and Food Science Technology**, v. 46, n. 1, p. 74-83, 2011.

SHIH, C.-H.; SIU, N. G. R.; WONG, E.; CHIU, L. C. M.; CHU, I. K.; LO, C. Quantitative analysis of anticancer 3-deoxyanthocyanidins in infected sorghum seedlings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 2, p. 254-259, 2007.

SHIM, T.; KIM, T.; JANG, K.; KO, J.; KIM, D. Toxicological evaluation and anti-inflammatory activity of a golden gelatinous sorghum bran extract. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 77, n. 4, p. 697-705, 2013.

SOUSA, A. R. de; MOREIRA, M. E. de C.; TOLEDO, R. C. L.; BENJAMIN, L. dos A.; QUEIROZ, V. A. V.; VELOSO, M. P.; REIS, K. de S.; MARTINO, H. S. D. Extruded sorghum (*Sorghum bicolor* L.) reduces metabolic risk of hepatic steatosis in obese rats consuming a high fat diet. **Food Research International**, v. 112, p. 48-55, 2018.

SOUSA, A. R. de; MOREIRA, M. E. de C.; GRANCIERIA, M.; TOLEDO, R. C. L.; ARAÚJO, F. de O.; MANTOVANI, H. C.; QUEIROZ, V. A. V.; MARTINO, H. S. D. Extruded sorghum (*Sorghum bicolor* L.) improves gut microbiota, reduces inflammation, and oxidative stress in obese rats fed a high-fat diet. **Journal of Functional Foods**, v. 58, p. 282-291, 2019.

SUHENDRO, E.; KUNETZ, C.; McDONOUGH, C.; ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Cooking characteristics and quality of noodles from food sorghum. **Cereal Chemistry**, v. 77, n. 2, p. 96-100, 2000.

SVENSSON, L.; SEKWATI-MONANG, B.; LUTZ, D. L.; SCHIEBER, A.; GÄNZLE, M. G. Phenolic acids and flavonoids in nonfermented and fermented red sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 16, p. 9214-9220, 2010.

TABERNERO, M.; VENEMA, K.; MAATHUIS, A. J. H.; SAURACALIXTO, F. D. Metabolite production during in vitro colonic fermentation of dietary fiber: analysis and comparison of two european diets. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 16, p. 8968-8975, 2011.

TALEON, V.; DYKES, L.; ROONEY, W. L.; ROONEY, L. W. Effect of genotype and environment on flavonoid concentration and profile of black sorghum grains. **Journal of Cereal Science**, v. 56, n. 2, p. 470-475, 2012.

TAYLOR, J. R. N.; EMMAMBUX, M. Developments in our understanding of sorghum polysaccharides and their health benefits. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 4, p. 263-271, 2010.

TAYLOR, J.; TAYLOR, J. R. N. Alleviation of the adverse effects of cooking on protein digestibility in sorghum through fermentation in traditional African porridges. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 129-138, 2002.

TEIXEIRA, N. de C.; QUEIROZ, V. A. V.; ROCHA, M. C.; AMORIM, A. C. P.; SOARES, T. A.; MONTEIRO, M. A. M.; MENEZES, C. B. de; SCHAFFERT, R. E.; GARCIA, M. A. V. T.; JUNQUEIRA, R. G. Resistant starch content among several sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes and the effect of heat treatment on resistant starch retention in two genotypes. **Food Chemistry**, v. 197, p. 291-296, 2016.

TIAN, Y.; ZOU, B.; LI, C.; YANG, J.; XU, S.; HAGERMAN, A. E. High molecular weight persimmon tannin is a potent antioxidant both ex vivo and in vivo. **Food Research International**, v. 45, n. 1, p. 26-30, 2012.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W.; CARVALHO, C. W. P.; TAKEITI, C. Y.; ASCHERI, J. L. R.; QUEIROZ, V. A. V. Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. **Food Research International**, v. 55, p. 37-44, 2014.

VELÁZQUEZ, N.; SÁNCHEZ, H.; OSELLA, C.; SANTIAGO, L. G. Using white sorghum flour for gluten-free breadmaking. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 63, n. 4, p. 491- 497, 2012.

VORAGEN, A. G. J. Technological aspects of functional food-related carbohydrates. **Trends in Food Science & Technology**, v. 9, n. 8/9, p. 328-335, 1998.

WALTER, M.; SILVA, L. P.; EMANUELLI, T. Amido resistente: características físico-químicas, propriedades fisiológicas e metodologias de quantificação. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 974-980, 2005.

WANISKA, R. D.; ROONEY, L. W. Structure and chemistry of the sorghum caryopsis. In: SMITH, W.; FREDERIKSEN, R. A. (ed.). **Sorghum: production, agronomy, chemistry and utilization**. New York: Wiley & Sons, 2000. p. 649-688.

WINGER, M.; KHOURYIEH, H.; ARAMOUNI, F.; HERALD, T. Sorghum flour characterization and evaluation in gluten-free flour tortilla. **Journal of Food Quality**, v. 37, n. 2, p. 95-106, 2014.

YANG, L.; ALLRED, K. F.; GEERA, B.; ALLRED, C. D.; AWIKA, J. M. Sorghum phenolics demonstrate estrogenic action and induce apoptosis in nonmalignant colonocytes. **Nutrition and Cancer**, v. 64, n. 3, p. 419-427, 2012.

YANG, L.; BROWNING, J. D.; AWIKA, J. M. Sorghum 3-deoxyanthocyanins possess strong phase II enzyme inducer activity and cancer cell growth inhibition properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 5, p. 1797-1804, 2009.

YANG, L.; DYKES, L.; AWIKA, J. M. Thermal stability of 3-deoxyanthocyanidin pigments. **Food Chemistry**, v. 160, p. 246-254, 2014.

YOUSIF, A.; NHEPERA, D.; JOHNSON, S. Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability. **Food Chemistry**, v. 134, n. 2, p. 880-887, 2012.

ZHANG, G.; HAMAKER, B. R. Low alpha amylase starch digestibility of cooked sorghum flours and the effect of protein. **Cereal Chemistry**, v. 75, n. 5, p. 710-713, 1998.

ZWEYTICK, G.; BERGHOFER, E. Production of gluten-free beer. In: GALIAGHER, E. (ed.). **Gluten-free food science and technology**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2009. p. 181-199.

Capítulo 17

Tecnologia de produção de sementes de sorgo

Crislene Vieira dos Santos
Pedro César de Oliveira Ribeiro
Karla Jorge da Silva
Cícero Beserra de Menezes

Introdução

O sorgo apresenta multiplicidade de usos, e pode ser caracterizado como uma máquina energética, uma vez que é usado na produção de grãos, forragem, biomassa, etanol, biogás, vassoura, dentre outros. Essa gama de funcionalidades é dada principalmente pela diversidade genética encontrada na classe *Sorghum*. Na Figura 1 A, adaptada de Morris et al. (2013), pode-se observar a distribuição das raças e sub-raças, divididas em grandes regiões (Figura 1B). A maior proporção de diversidade é contida em regiões africanas, com certa predominância das sub-raças *caudatum-guinea*, *bicolor-caudatum*, *caudatum-durra*, *bicolor-durra* e das raças *guinea* e *durra* (Morris et al., 2013).

Toda essa diversidade apresentada pela cultura do sorgo indica aos melhoristas o ponto de partida de seus programas, que se iniciam com a escolha de genitores (linhagens) para compor os cruzamentos que darão origem à população de melhoramento. A escolha de populações e linhagens deve ser realizada com base em características de importância agrônômica e na capacidade de combinação entre as linhagens. Assim, conhecer as fontes de variabilidade é a chave para realizar recombinações entre linhagens que resultem em descendentes potenciais. Por fim, todo o trabalho do melhoramento estará contido na semente, unidade básica que carrega consigo o material genético.

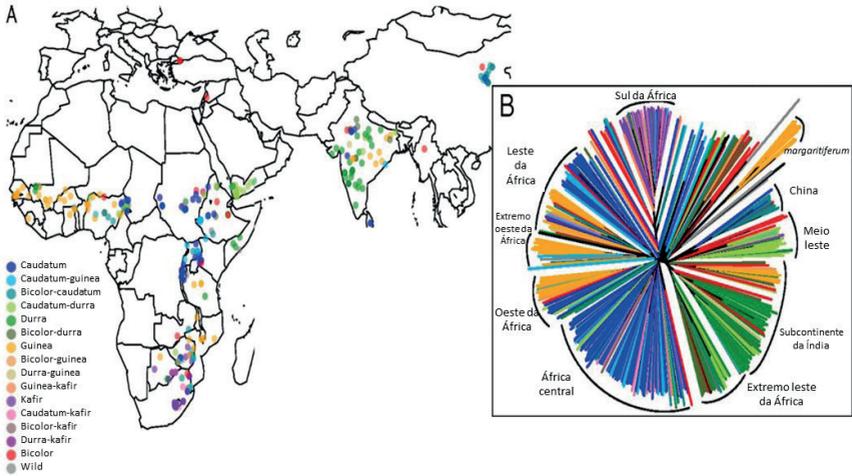


Figura 1. Mapa de diversidade genética A) das raças e sub-raças da classe *Sorghum*, e B) distribuição das classes em grandes regiões do mundo.

Fonte: Adaptado de Morris et al. (2013).

A semente é sem dúvidas o insumo agrícola de maior valor agregado e menor custo, se comparado aos demais insumos utilizados na implementação das lavouras (Utino et al., 2014). E, assim como todas as atividades agrícolas, a produção de sementes também necessita de leis, normas, padrões de qualidade e fiscalização para seu desenvolvimento. A Lei de Sementes e Mudanças e a Lei de Produção de Cultivares (LPC) (Brasil 2003) são as principais leis regulamentadoras das diretrizes de produção de sementes.

Os cuidados com a produção de sementes de sorgo vão desde estabelecimento de campos de produção, planejamento, escolha da categoria da semente, escolha da área, escolha de cultivar, época de semeadura, preparo do solo, manejo da cultura com tratamentos, irrigação, passando por isolamento adequado dos campos isolados, até o *roguing* (controle de sorgo selvagem e tigueras na lavoura), dentre outros (Androcióli, 2014). Contudo, Ribas (2000) relata que estas práticas de regulamentação na cultura do sorgo só foram adotadas no final dos anos 60, com a ampliação da produção e distribuição de sementes melhoradas.

A partir de 1970, a produção de sorgo se expandiu no Sul do País, por

meio da introdução dos híbridos "anões", recém-lançados na Argentina. A utilização deste germoplasma em sorgo foi proposta para facilitar o processo de produção e colheita de sementes híbridas em campos sementeiros, uma vez que as plantas apresentavam porte em torno de 120 cm, diminuindo, assim, as perdas na colheita por acamamento de plantas, que era um dos principais fatores de prejuízos na produção (Packer; Rooney, 2014). Até então, os estados sulistas obtinham a liderança da produção de sementes e grãos de sorgo, como maiores produtores e consumidores, chegando a uma área de 25 mil hectares, o que representava aproximadamente 30% da área total de cultivo de sorgo no Brasil (Ribas, 2000). Este crescimento e expansão das áreas de cultivo de sorgo estimularam as pesquisas visando à produção de sementes genéticas, certificadas de acordo com os requisitos normativos do Ministério da Agricultura (Brasil, 2005).

Atualmente, o Centro-Oeste e Sudeste do Brasil têm ganhado ênfase na produção nacional de grãos, representados principalmente pelos estados de Goiás e Minas Gerais, respectivamente. Goiás assumiu destaque no mercado produtor, com estimativa de 710 mil toneladas de grãos, em 229 mil hectares. E, segundo a projeção de julho de 2020, a Conab estima para o Brasil um total de 808,7 mil hectares de sorgo, o que representa uma área de produção quase 20 vezes maior do que a 50 anos atrás (Acompanhamento da Safra Brasileira [de] Grãos, 2020). Este incremento se deu em grande parte pela aposta no potencial do sorgo, que foi melhorado geneticamente, e também em termos de condução nos campos de produção de semente, o que elevou os padrões de qualidade, vigor e pureza das sementes.

Aspectos Culturais do Sorgo

Antes de realizar a implantação de campos de sementes ou quaisquer outros sistemas de produção, mesmo em pequenas áreas, é fundamental que o produtor conheça a espécie com a qual vai trabalhar. Essa sequência de eventos torna o manejo da cultura mais efetivo e assertivo. E isso envolve o conhecimento desde o preparo das sementes, preparo da área, semeadura correta, conduções com apoio de pessoal qualificado, até a colheita no momento ideal e o beneficiamento das sementes.

Sementes

Para conhecer melhor os aspectos fitotécnicos do sorgo é preciso começar pela semente. As sementes do sorgo possuem em média 4 mm de comprimento, menos de 2 mm de diâmetro, e apresentam três estruturas básicas, sendo elas o tegumento, o endosperma e o embrião (Figura 2). O tegumento é o envoltório protetor da semente, que tem sua resistência associada ao pericarpo, que se apresenta numa camada mais interna. Em uma camada ainda mais interna, fica o endosperma, um tecido de armazenamento de nutrientes, com função de reserva energética para a semente. No perímetro inferior direito, fica o eixo embrionário, responsável pelo estímulo de germinação da semente, onde se encontra a radícula que origina as raízes da planta.

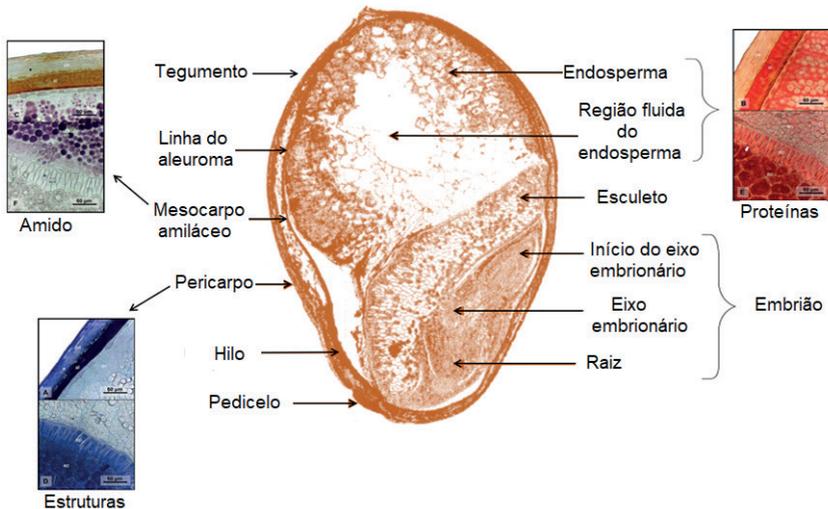


Foto: Afonso Júnior.

Figura 2. Corte horizontal da semente de sorgo, e observação em microscópio eletrônico.

Basicamente a semente de sorgo é constituída por massa seca (88%) e água (12%). A maior proporção, admitida como massa seca, é composta por amido e proteínas, que se encontram no endosperma e na porção mais periférica da semente (tegumento ou testa). As sementes de sorgo apresentam em torno de 55% a 75% de amido (Queiroz et al., 2014), 11% de proteínas brutas (United States, 2017), de 2% a 6% de fibras, entre 0,5% e 5,2% de

lipídeos (Awika; Rooney, 2004) e 1,46% de resíduo mineral, representados por fósforo, magnésio, potássio e cálcio, principalmente (United States, 2017).

As sementes possuem formato oval, parcialmente arredondado, e admitem uma diversidade de coloração do tegumento (Figura 3), que varia numa escala de tons que vai do branco, amarelo, vermelho, marrom ao preto, como representado na Figura 3.



Foto: Luciane Torres.

Figura 3. Diversidade de colorações do tegumento de sementes de sorgo.

Flores Monoicas

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] possui flor completa, com gineceu (estigma + estilete) e androceu (antera + filete) na mesma flor, o que auxilia no tipo de reprodução mista, caracterizada pela taxa de fecundação cruzada superior a 10%, que varia dependendo das condições climáticas (Borém et al., 2014).

Uma flor de sorgo é composta por três espiguetas, sendo duas pediceladas (estéreis) e uma séssil (fértil) (Figura 4). Quando ocorre a abertura da espiguetas séssil, os grãos de pólen liberados pela antera entram pelo estigma, também chamado de tubo polínico, chegando ao ovário. O ovário é o receptáculo para a fecundação e formação das sementes. As sementes formadas são envoltas pela lema, que é interna à gluma II, e pela palea, envolta pela gluma I (Schaffert; Rodrigues, 2014) (Figura 4).

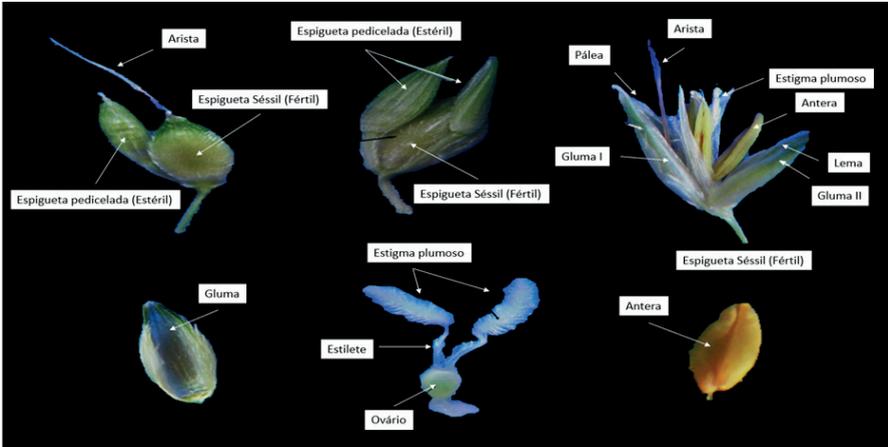
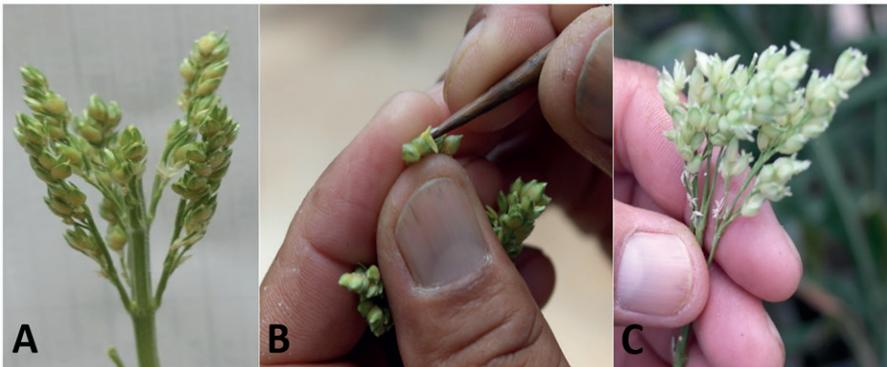


Foto: Luciane Torres.

Figura 4. Estruturas florais da inflorescência do sorgo.

Para realizar o cruzamento entre linhagens, a fim de produzir híbridos, tem-se utilizado a macho-esterilidade citoplasmática, que será mais detalhada em outro capítulo deste livro, ou a emasculação das linhagens a serem utilizadas como fêmeas. A emasculação se trata da remoção manual da antera, o que é bastante trabalhoso, e necessita de mão de obra especializada e conhecimento das etapas do florescimento, para o sucesso da operação (Figura 5). Dessa forma, a macho-esterilidade se torna vantajosa para a multiplicação de sementes em campo, uma vez que facilita os cruzamentos e possibilita a produção de sementes em maior escala e com menos dispêndio de mão de obra e tempo.



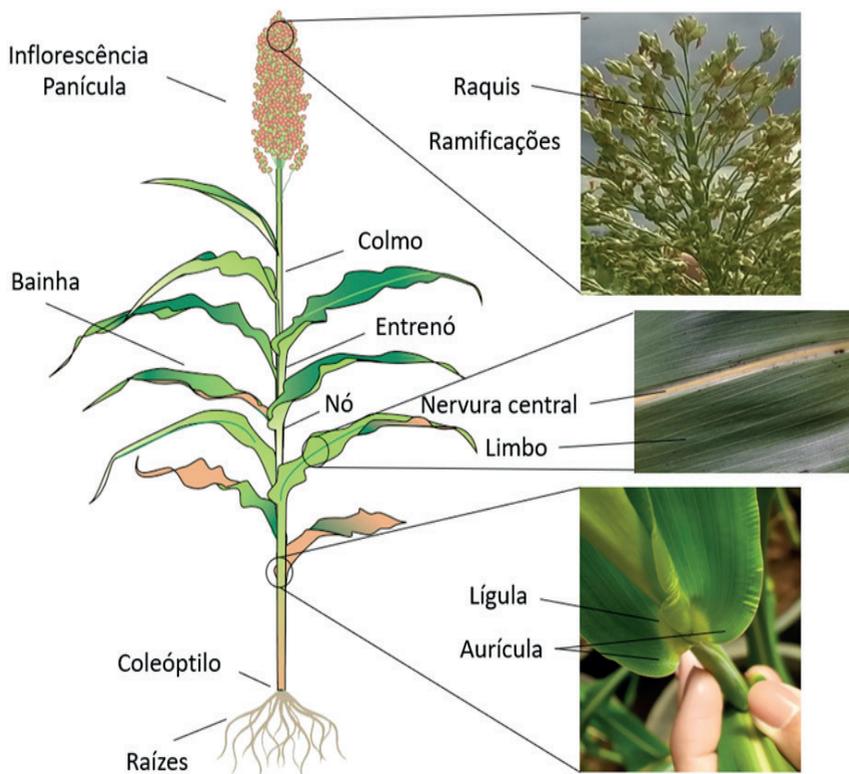
Fotos: Ruane Silva.

Figura 5. Procedimento de emasculação (retirada da antera) da flor de sorgo. Panícula pronta para emasculação (A); retirada das anteras (B); panícula emasculada e pronta para futuros cruzamentos (C).

Estrutura da Planta

A estrutura da planta de sorgo é típica e possibilita a distinção da cultura, como segue no esquema abaixo (Figura 6). A inflorescência, estrutura que comporta toda a formação floral, em sorgo é chamada de panícula. A panícula por sua vez, apresenta uma estrutura central chamada de raquis, que possui ramificações primárias e secundárias. Essas ramificações secundárias terminais comportam os racemos de espiguetas, onde as flores se desenvolvem (Schaffert; Rodrigues, 2014).

As folhas são dispostas em filotaxia oposta nos caules, e são constituídas por bainha, uma nervura central, e linhas finas, paralelas à nervura principal. Na intercessão foliar com o caule se encontram a lígula e a aurícula (formando o colar). O coleóptilo se encontra na base da planta, e abaixo dele se inicia o sistema radicular.

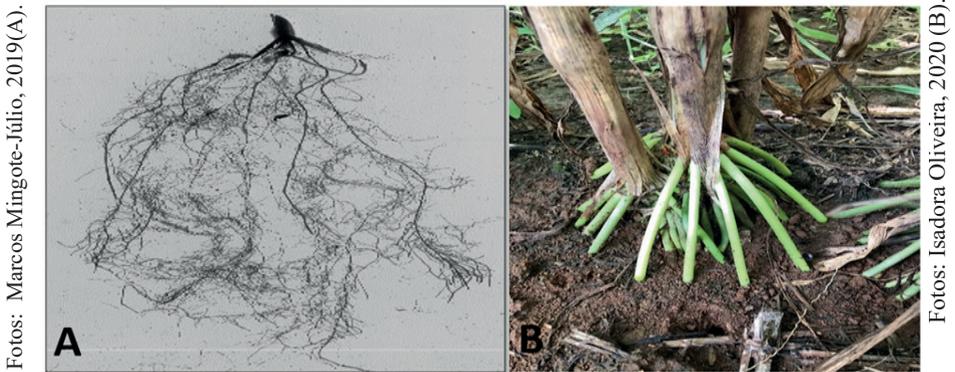


Fotos: Ruane Silva.

Figura 6. Esquema da planta completa de sorgo e descrição das partes vegetativas.

Sistema Radicular

O sistema radicular do sorgo é formado por raízes primárias ou seminais, secundárias e adventícias. Basicamente as raízes primárias aparecem inicialmente e em seguida dão lugar às raízes secundárias. Essas se tornam raízes principais, com diversas ramificações, e se desenvolvem em volume e profundidade (Figura 7 A). Em geral, o surgimento das raízes adventícias está associado a algum tipo de estresse, como déficit ou excesso de água, por exemplo, em que a planta emite suas raízes em busca de oxigênio. Porém, em alguns genótipos de maior porte, as raízes adventícias surgem como estrutura de sustentação, sendo pouco eficientes para auxiliar na absorção de nutrientes (Figura 7 B) (Magalhães et al., 2003).



Fotos: Marcos Mingote-Júlio, 2019(A).

Fotos: Isadora Oliveira, 2020 (B).

Figura 7. Raízes principais em estágio E1, e raízes adventícias em planta de sorgo, com função de sustentação.

O sistema radicular do sorgo atinge profundidades que variam de 1,5 m a 2,0 m, sendo que aproximadamente 80% desse volume radicular encontram-se nos primeiros 60 cm. O sistema radicular do sorgo é considerado bastante eficiente em adquirir água e nutrientes do solo. Contudo, tanto o crescimento radicular quanto o desenvolvimento das plantas podem ser considerados como processos de alta plasticidade fenotípica, o que significa que os componentes genéticos que expressam essas características são bastante influenciados por fatores ambientais (Parra-Londono et al., 2018). Isso ocorre, principalmente, no caso de características associadas ao desenvolvimento radicular, que ainda são pouco exploradas, comparado aos estudos de partes aéreas. Isto acontece porque a interação solo x planta compreende um grande número de associações que podem moldar morfológicamente uma raiz, ao ponto de

torná-la mais ou menos eficiente na aquisição de nutrientes.

O sorgo, por sua vez, apresenta alta variabilidade em relação à morfologia radicular, que pode, por exemplo, estar relacionada à eficiência na aquisição e utilização de fósforo. Bernardino (2014), por exemplo, conseguiu associar a eficiência de aquisição de fósforo com produção de grãos mesmo em condições de baixa disponibilidade do nutriente, o que mostra o potencial da cultura na absorção de diferentes nutrientes. Além disso, vale ressaltar que o sistema radicular é o primeiro órgão sensível à falta de água, que pode se converter em estresse hídrico, e a estresses abióticos, como subfertilização, alta concentração de alumínio no solo, baixa disponibilidade de fósforo, dentre outros.

Síntese de Híbridos de Sorgo

O sistema de tecnologia de produção é constituído por etapas que se iniciam com o melhoramento genético, e vão até a produção comercial. Com isso, a multiplicação das sementes de sorgo é essencial para manutenção do estoque de sementes genéticas e de sementes básicas, a fim de atender a demanda da produção comercial dos híbridos. Mas, antes de se explorar mais as fases de produção de sementes, é necessário primeiro entender sobre a fenologia e o tipo de reprodução da espécie *Sorghum bicolor*, para que este conhecimento direcione a compreensão das outras etapas.

No início dos programas de melhoramento era muito mais comum a utilização de linhagens ou variedades, até a descoberta da esterilidade masculina, na década de 1950 (Smith; Frederiksen, 2000). O primeiro sistema CMS (*Cytoplasmic Male Sterility*) foi encontrado no núcleo citoplasmático da raça *kafir* (Reddy et al., 2005), que ainda hoje é o principal germoplasma utilizado como fonte de esterilidade masculina para a produção de híbridos comerciais.

O processo de multiplicação de sementes genéticas de sorgo é dividido em dois pools genéticos, representados pelo grupo (A-B) e o grupo R. Primeiramente visa-se o desenvolvimento de linhagens (A-B), e, simultaneamente, ocorre o melhoramento das linhagens R. Com isso, é possível proteger a tecnologia gerada (sementes híbridas), através do Registro Nacional de Cultivares (RNC) e explorar a heterose ou "vigor híbrido" (Brasil, 2017).

Para a obtenção dos híbridos de sorgo são necessárias três linhagens (Figura 8), sendo elas as linhagens A (Macho-estéril), B (Mantenedora)

e R (Restauradora). As linhagens A e B são isogênicas, ou seja, são idênticas em quase todos os seus alelos, se diferenciando em poucos locus. Particularmente neste caso, a principal diferença entre tais linhagens é a fertilidade, determinada pelo citoplasma. Isto é, a linhagem A apresenta genes nucleares *rfrf*, com citoplasma e fenótipo estéril, e a linhagem B também apresenta genes nucleares recessivos (*rfrf*), mas com citoplasma e fenótipo fértil. A linhagem A é aquela que deve ser utilizada como parental feminino, por não apresentar produção de pólen, em razão dessa herança genético-citoplasmática. Contudo, a linhagem B, apesar de apresentar citoplasma normal, portanto, com produção de pólen, não tem capacidade de restaurar a fertilidade da linhagem A, para a produção de sementes. A linhagem B é utilizada basicamente no processo de multiplicação da linhagem A (Ribeiro et al., 2020; Oliveira et al., 2019). Com isso, é preciso empregar a linhagem R (*RfRf*), que é utilizada como parental masculino, para restaurar a fertilidade da linhagem A, e assim obtermos a produção de sementes híbridas férteis.

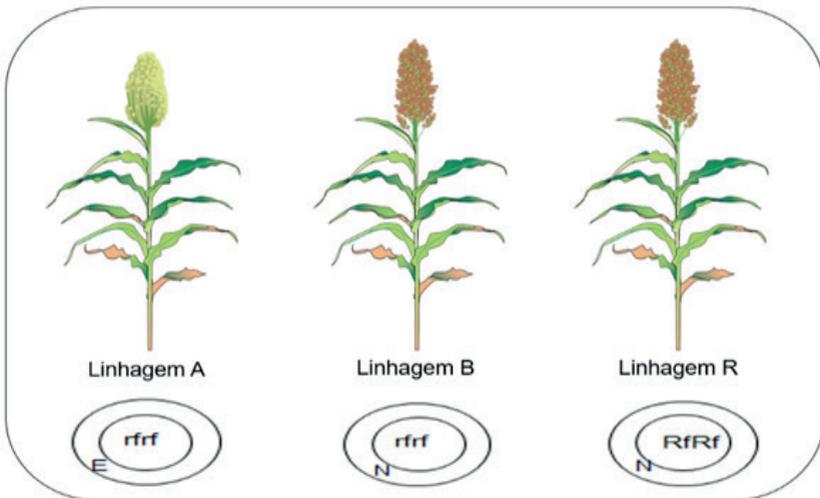


Figura 8. Gene nuclear recessivo (*rfrf*) das linhagens A e B, e gene nuclear dominante da linhagem R (*RfRf*) capaz de restaurar a fertilidade.

Para isso, atualmente têm sido utilizadas linhagens A, macho-estéreis, conduzidas como parentais femininos, que são cruzadas com linhagens R, parentais masculinos, capazes de restaurar essa fertilidade para a produção de sementes. Os fenótipos de esterilidade e fertilidade podem ser vistos na Figura 9, que apresenta as estruturas reprodutivas das flores.



Foto: Cícero Beserra de Menezes

Figura 9. Estruturas reprodutivas da planta de macho-fértil (esquerda) com anteras produzindo pólen, e planta macho-estéril (direita), com anteras finas, sem produção de pólen.

Pesquisa de Produção de Híbridos

O objetivo principal da pesquisa de produção é determinar a producibilidade de cada cultivar, reunindo o maior número de informações técnicas possíveis a respeito da viabilidade da produção comercial dos híbridos. Para isso é preciso conhecer o comportamento de cada linhagem, que dará origem ao híbrido, em diferentes locais e épocas de cultivo. Nesta fase são feitos testes de split (coincidência de florescimento) entre os parentais para que ocorra o florescimento juntos de ambas as linhagens.

Escolha da Região

Neste tópico serão abordados aspectos que devem ser atentados antes do estabelecimento dos campos de produção. Um ponto crucial é a escolha das áreas mais adequadas para a produção de sementes de sorgo (Figura 10). A escolha desses locais é tão importante que um erro pode interferir na quantidade, qualidade e sanidade das sementes. É importante que na região não chova após a maturação fisiológica das sementes. Para tanto, produtores plantam mais tarde do que a cultura de grãos e suplementam com irrigação no enchimento de grãos, para que a colheita ocorra em época seca.

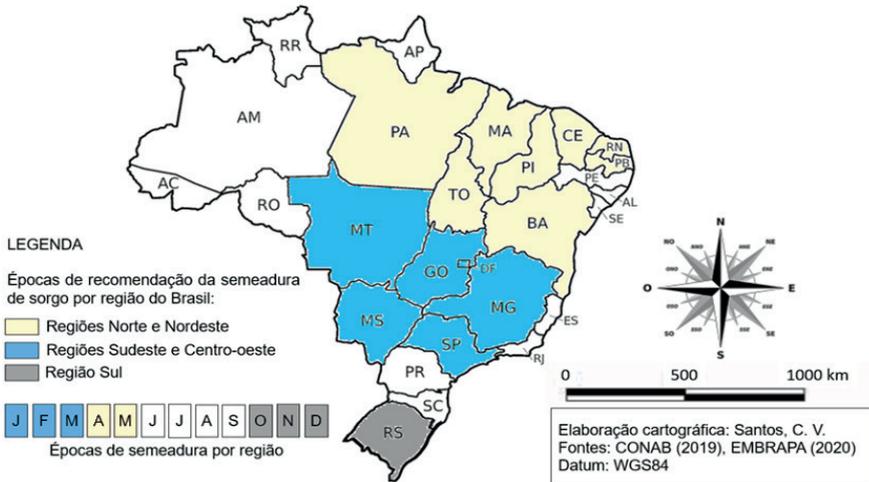


Figura 10. Épocas de semeadura do sorgo nas diferentes regiões produtoras de semente.

Implantação dos Ensaios *Split*

Antes da instalação dos campos de produção de sementes, também chamados de campos isolados, são montados os ensaios *Splits*. Estes ensaios são fundamentais para conhecer a coincidência nos padrões de florescimento entre as linhagens A (fêmea) e R (macho), além de avaliar outras características fitotécnicas das linhagens. Os ensaios *Split* são estabelecidos preferencialmente na região de cultivo dos futuros campos isolados. Quando isso não é possível é importante avaliar estes ensaios em locais com condições edafoclimáticas semelhantes, ou seja, altitude, temperatura, umidade relativa e padrões de fertilidade do solo. Além disso, deve-se respeitar a recomendação de época de plantio para cada local.

As parcelas experimentais devem ser compostas por quatro linhas, com 5 m ou mais, com duas bordaduras. Quanto às épocas de semeadura é importante respeitar o intervalo de 15 dias entre cada material dentro da parcela, dependendo do ciclo de cada um dos parentais masculinos avaliados. Esse intervalo pode ser de 0, 5, 10 e 15 dias, sendo o parental mais tardio semeado no dia 0, e o mais precoce, no dia 10 ou 15. É importante que o responsável pelas avaliações do campo de *Split* tenha sempre as anotações de ciclo de cada linhagem, a fim de realizar essa semeadura de forma a

coincidir as épocas de florescimento entre linhagens A e R. Essa avaliação será essencial para recomendar o *Split* mais eficiente para a produção do híbrido desejado. Com isso, os parentais femininos podem ser semeados com 5 ou 10 dias a mais, como mostrado no croqui abaixo (Figura 11), da primeira data de plantio das linhagens macho.

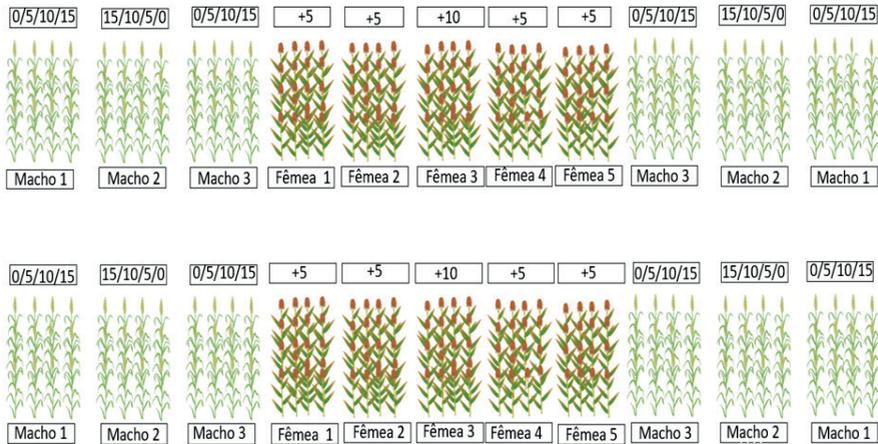


Figura 11. Montagem de croqui para ensaio de *Split*, com diferentes datas de semeadura de machos e fêmeas para avaliação de coincidência de florescimento. Fonte: Adaptado de Androcíoli (2014).

Nos estudos preliminares para produção de sementes devem ser coletados diversos dados de campo que irão determinar o sucesso da produção. Algumas das avaliações realizadas são:

A) Tempo e volume de produção de pólen pelo parental masculino

As linhagens de sorgo, em geral, apresentam um intervalo de produção de pólen viável que varia entre 7 e 15 dias. Essa variação depende em grande parte das condições climáticas, como temperatura e umidade, que podem ampliar ou minimizar o tempo de viabilidade dos grãos de pólen. De forma geral, a temperatura ótima média para condução dos campos isolados é de 20 °C, com mínima de 16 °C e máxima de 38 °C (Menezes et al., 2015). O pólen do sorgo é altamente funcional por cerca de 30 min após a deiscência das anteras, mas sua longevidade é limitada a duas a quatro horas. Uma vez que o pólen viável atinge o estigma receptivo, ele germina, e a fertilização ocorre em 2 horas, geralmente ao amanhecer, quando as temperaturas estão

baixas (Schaffert; Rodrigues, 2014).

No momento da reprodução é quando as plantas de sorgo precisam de mais água para conseguirem dividir seus gastos energéticos entre o crescimento vegetativo e reprodutivo de maneira simultânea. Dessa forma, este estágio de desenvolvimento é o mais comprometido quando coincide com longos períodos de estiagem e/ou altas temperaturas (Menezes et al., 2015).

B) Tempo de abertura floral dos parentais femininos

Basicamente, a abertura floral necessita de um intervalo de temperatura de 15°C a 22°C, que ocorre nas primeiras horas do dia. Contudo, suporta temperaturas mais amenas, desde que estas não estejam combinadas às altas umidades relativas. Isto porque alguns fungos, como *Claviceps africana*, agente causal da doença do ergot, se desenvolvem preferencialmente nessas condições. E, neste caso, a formação de conídios e esclerócios é maximizada pela interação patógeno x ambiente. O que leva à menor produção de grãos (Cisneros-López et al., 2010).

A floração dura normalmente uma semana, mas pode variar de 2 a 15 dias. Os estigmas são receptivos por 48 horas antes da antese e podem permanecer receptivos por 5 a 16 dias dependendo da cultivar (Schaffert; Rodrigues, 2014).

C) Coincidência da antese entre as linhagens

Para obter esta informação é preciso acompanhar a lavoura, marcando o número de dias desde a data de semeadura até a antese da linhagem A (macho estéril), que em campos isolados são responsáveis por receber o pólen e produzir as sementes. A linhagem R (restauradora) é responsável por fornecer o pólen nos campos isolados de produção de híbridos. Estes dados vão auxiliar os melhoristas a escalonar os plantios entre as linhagens, a fim de coincidir o período de florescimento entre estas, formando os *Splits* de plantios, técnica que maximiza a coincidência entre a receptividade das flores e a disponibilidade de pólen.

D) Obtenção de rendimento e qualidade de sementes

Um pré-requisito para as linhagens A (fêmeas) é que estas sejam excelentes produtoras de sementes. Este parâmetro é fundamental para compreender a viabilidade da utilização deste genitor, estando este fator

ligado ao custo de produção de sementes híbridas que serão comercializadas. Além disso, os genitores femininos podem apresentar sementes de qualidade e aspectos do grão que podem favorecer ou reduzir o custo de produção das sementes híbridas.

E) Avaliação de incidência de doenças foliares

Também é importante realizar a avaliação de doenças foliares como antracnose (*Colletotrichum sublineolum*), helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*), cercosporiose (*Cercospora sorghi*) e ferrugem (*Puccinia purpurea*). Essas doenças são as mais comuns encontradas em sorgo, e para reduzir os danos econômicos para o sistema de produção devem ser selecionados genótipos resistentes.

F) Avaliação de incidência de pragas

É importante fazer o monitoramento de pragas, que podem estar presentes nas regiões de cultivo. Algumas das pragas que mais afetam os campos de produção são corós, brocas-do-colmo, lagarta-elasma (*Elasmopalpus lignosellus*), broca-da-cana-de-açúcar (*Diatrea* sp.), pulgão-verde (*Schizaphis graminum*), pulgão-do-milho (*Rhopalosiphum maidis*), lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), lagarta-da-espiga-do-milho (*Helicoverpa zea*) e percevejo-verde (*Nezara viridula*).

Quando se trata de controle de pragas é essencial lembrar que os métodos de controle sempre devem ser integrados com boas práticas culturais, e com controle no momento certo, com o intuito de reduzir a população de pragas ao nível de não dano econômico. Para isso, o monitoramento das lavouras deve ser realizado constantemente, possibilitando indicar o melhor momento de realizar o controle, seja biológico ou químico.

G) Observação da incidência de doenças de panícula

As doenças que atacam as panículas promovem quedas significativas na produção final dos campos de produção de sementes. Na Figura 12, pode-se observar o grão de pólen de sorgo, exposto à luz Ultravioleta (UV) quando ocorre a polinização e a inoculação de *Claviceps africana*, que entra pelo tubo polínico. Dezoito horas após a inoculação, ocorre a rápida multiplicação dos macroconídeos (m) e microconídeos (mc) em volta do grão de pólen (gp) (Figura 12 A). Em torno de 48 horas após a inoculação, ocorre o crescimento das hifas de *C. africana* e formação do tubo germinativo (gt) (Figura 12 B). Em poucas horas a colonização está completa, com as hifas penetrando

totalmente o grão de pólen (Figura 12 C).

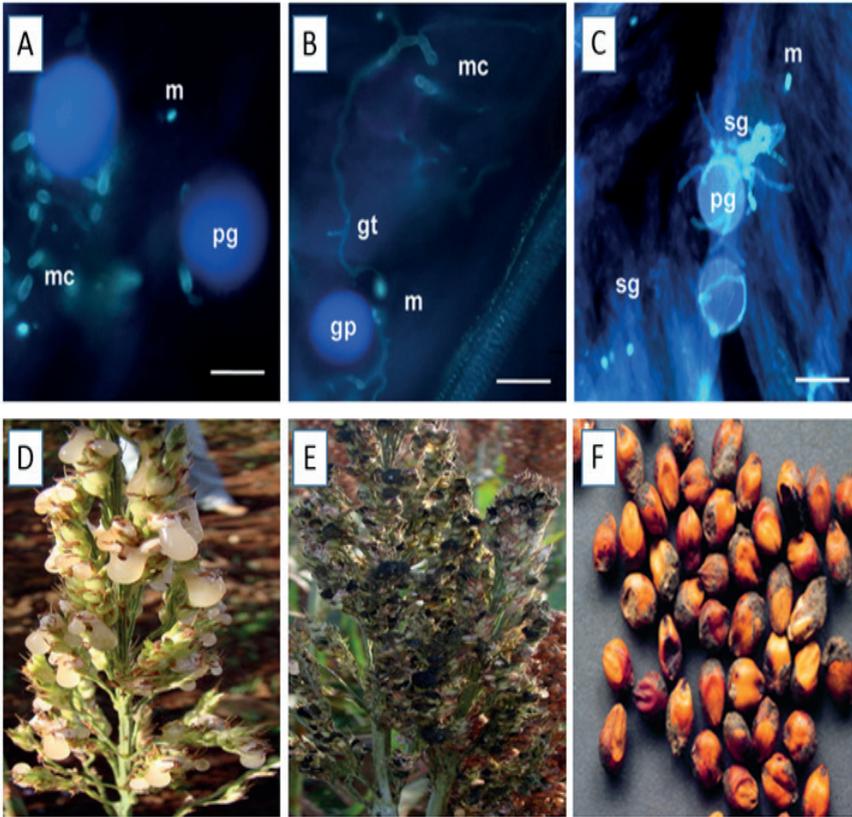


Figura 13. Multiplicação de macro (m) e microconídeos (mc) de *Claviceps africana* (A), desenvolvimento de hifas (B) e colonização dos grãos de pólen (C), e os sintomas de mela nas panículas (D - E), e sementes (F); macroconídeos (m); microconídeos (mc); grão de pólen (gp); tubo germinativo (gt); estigma (sg).

Fonte: Adaptado de Cisneros-López et al. (2010).

Os conídios do fungo se multiplicam rapidamente através de suas hifas, e são capazes de infectar toda a panícula. A planta, “entende” a infecção como uma “fecundação” e continua mandando seiva do xilema para suprir o crescimento da semente. O fungo se alimenta da seiva do xilema e produz um subproduto açucarado, que preenche o receptáculo onde estaria a semente (Figura 12 D). Com isso, essa “mela” se espalha por toda a panícula, e mesmo aquelas flores devidamente polinizadas são cobertas (Figura 12 E).

Além de gerar o prejuízo pelas flores não fecundadas, e redução da produção de sementes, ocorre a perda na qualidade das poucas sementes produzidas (Figura 12 F).

H) Verificação da densidade de plantas e população ideal de plantas

A recomendação de densidade populacional em lavouras de sorgo granífero é de aproximadamente 200.000 plantas por hectares, obtidas pelo estande de 10 plantas por metro linear, em espaçamentos de 0,5 m entre linhas (Borém et al., 2014). Contudo, esta densidade pode variar de acordo com as condições edafoclimáticas do local de cultivo, composição de solos (mais argilosos ou arenosos), e material genético implantado. Assim, é importante reavaliar o arranjo de plantas, com base nessas condições.

I) Proporção de plantio dos parentais (fêmea/macho)

A proporção de plantio entre linhagens A e linhagens R é variável, já que cada linhagem R (macho) tende a apresentar uma capacidade de produção de pólen. Com isso, essa avaliação é fundamental na hora da montagem dos experimentos em campo, para que as linhas de parental masculino sejam capazes de produzir pólen suficiente para fecundar as linhas de parentais femininos. A proporção mais usada é 12 linhas da fêmea para quatro linhas do macho polinizador. Em média, cada quilograma de semente básica pode atingir produções superiores a 200 quilogramas de sementes certificadas (Androcíoli, 2014).

Plantio e Condução do Campo de Semente

Esquema de Campo Isolado

O esquema abaixo representa um croqui reduzido de um campo isolado 4:2, ou seja, quatro linhas de fêmea para duas linhas de macho, para a produção de sementes de sorgo (Figura 13). Esta proporção de número de fileiras de linhagem A e linhagem R pode ser modificada de acordo com as avaliações e os resultados dos ensaios *Split*, quando é observada a capacidade de produção e dispersão de pólen pela linhagem R (macho). Alguns esquemas utilizados também são 6:3, e às vezes com duas épocas de semeadura para as linhagens de macho, nos dias 0 (no mesmo dia da fêmea) e 14 (dias após a semeadura da fêmea) a fim de coincidir os períodos de florescimento com a linhagem A. Na Figura 14, o comprimento de fileiras é de 5 m (mínimo exigido) e são acrescidas bordaduras, constituídas pela mesma linhagem

R utilizada como parental masculino. A densidade de semeadura é de 10 plantas por metro, para evitar competição por água e nutrientes, o mesmo recomendado na lavoura comercial.

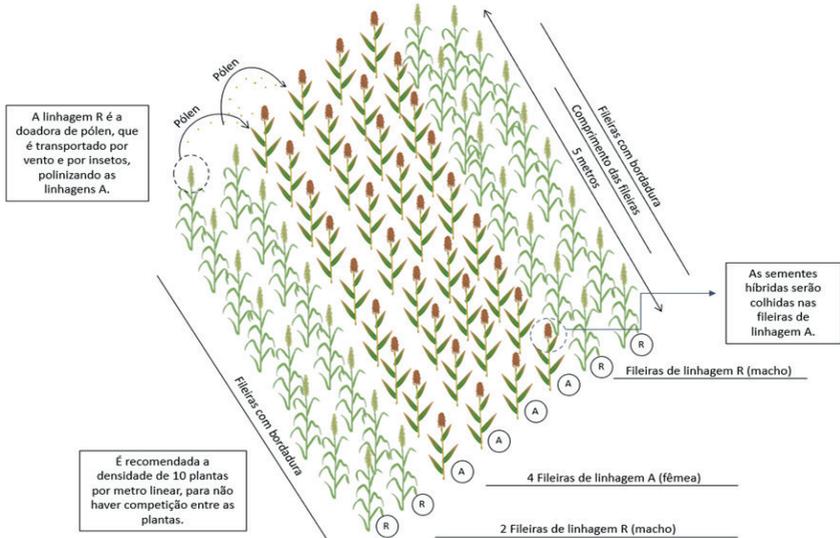


Figura 13. Campo isolado para produção de sementes do híbrido de sorgo.

O isolamento de um campo de produção de sementes pode ser feito através de distância ou por diferença entre datas de plantio. Existem normas de isolamento estabelecidas pelo Ministério da Agricultura (Tabela 1).

Tabela 1. Padrões de isolamento (m) para produção de sementes de sorgo granífero e forrageiro (Instrução Normativa nº 25, de 16 de dezembro de 2005, do Ministério da Agricultura e Abastecimento).

Parâmetros	Isolamento (m)
	Sementes básicas e certificadas
Cultivares de mesmo grupo	300
Cultivares de grupos diferentes	600
Capim Sudão (<i>Sorghum sudanense</i> L.)	1.500
Capim Massambará (<i>Sorghum halepense</i> L.)	1.500
Capim de Boi (<i>Sorghum verticilliflorum</i>)	1.500

Vale lembrar que o prazo máximo de inscrição de campo de produção de sementes no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento é de até 30 dias após o plantio.

Semeadura do Campo

Antes de realizar a semeadura é preciso definir o sistema de produção da área, ou seja, se o campo será conduzido sob plantio convencional ou sob sistema de plantio direto. O sistema de plantio direto já tem sido bastante empregado tanto em lavouras comerciais quanto em campos de produção de sementes de sorgo, aproveitando a palhada e nutrientes da cultura antecessora. No entanto, na implantação dos campos isolados neste sistema deve-se atentar para os produtos (herbicidas) aplicados na cultura anterior, que podem resultar em fitotoxicidade nas plantas de sorgo. Sabe-se que não existem muitos herbicidas registrados que sejam seletivos para sorgo, e com isso, até mesmo os herbicidas utilizados em pré-emergência da cultura apresentam certos níveis de fitotoxidez que podem interferir drasticamente na germinação, no crescimento, no desenvolvimento e até na produtividade do sorgo.

Além da preocupação com a área de plantio, outro aspecto fundamental que deve ser avaliado antes da semeadura são as taxas de germinação e vigor das sementes das linhagens, que devem estar sempre acima de 85%, para garantir o estande inicial de plantas. Depois dessas etapas, a próxima fase é o preparo e adubação do solo.

A profundidade de plantio varia entre 3 e 5 cm, dependendo do tipo de solo da região. Solos mais argilosos possuem mais resistência para a emergência da semente, e com isso a recomendação pode variar, comparando-se com solos mais arenosos, em que a resistência é menor. Em geral, a emergência das plântulas ocorre entre cinco e sete dias após a semeadura (DAS), quando em condições ótimas de temperatura, que variam de 20 °C a 35 °C.

Adubação

A adubação química do solo deve ser realizada mediante a interpretação da análise química, e com base nela serão recomendadas formulação e quantidade de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e micronutrientes (Zn, B, Cu, Mo, Co, Mn) demandados para suprir a necessidade nutricional das

plantas durante seu ciclo.

A análise química e física do solo deve ser feita entre o intervalo de implantação de uma espécie e de outra, e com base na sua interpretação, a recomendação pode ser procedida. Contudo, ainda é recomendada a adubação de cobertura aos 30 dias após a semeadura com uma dose de nitrogênio ou nitrogênio + potássio. Estes nutrientes são bastante lixiviados por irrigação ou volatilização, e por isso é importante parcelar as aplicações em doses, para minimizar as perdas.

Tratamento de Sementes

O tratamento de sementes básicas e genéticas é realizado para proteção das sementes desde o armazenamento até o momento de semeadura. Este tratamento é realizado na Unidade Básica de Sementes (UBS), com o uso de fungicidas e inseticidas para a proteção de pragas que se alimentam do endosperma e embrião das sementes, como carunchos. Dentre estes produtos também são necessários agentes de proteção da semente contra pragas de solo. Para estes últimos é realizada uma nova aplicação de reforço para controle do ataque de insetos mastigadores (insetos da ordem coleóptera) e sugadores (percevejos, cigarrinhas) e trips (que raspam as folhas).

Controle de Plantas Daninhas

Atualmente existem poucos produtos herbicidas seletivos que sejam registrados especificamente para a cultura do sorgo, o que legalmente traz muitas restrições em termos de controle químico para a cultura. Até mesmo o manejo químico, realizado em culturas anteriores, pode representar riscos para a germinação das sementes de sorgo. Isso ocorre principalmente no caso de linhagens, que apresentam mais sintomas de fitotoxicidade, e desse modo o controle de plantas daninhas deve ser mais cauteloso.

Em pré-emergência do sorgo pode-se aplicar atrazina para controle inicial de plantas daninhas de folha larga e folha estreita. Nesta fase inicial o controle das plantas daninhas deve ser realizado rapidamente para reduzir a competição dessas com a cultura principal. A atrazina também pode ser utilizada em pós-emergência do sorgo, mas com algumas considerações em relação ao estágio fenológico do sorgo, que deve estar entre V8 e emissão de folha bandeira, considerando ainda que haja diferenças nos ciclos das linhagens fêmeas e machos, quando há intervalo de plantio entre elas. As

aplicações podem ser realizadas em área total, já que a atrazina é seletiva para o sorgo, ou em jato dirigido ou mesmo a capina, quando se considerar risco de fitotoxicidade, com necessidade de controle próximo da fase de emborrachamento.

Controle de Pragas

O controle de pragas deve ser realizado nas fases iniciais da cultura, ou assim que seja detectado nível populacional significativo das pragas. As etapas de definição da capacidade produtiva, principalmente, são as que sofrem mais com o ataque de insetos, com isso, devem-se tomar medidas preventivas para que não sejam atingidos níveis de dano econômico na cultura. Na fase de enchimento de grãos, insetos mastigadores e sugadores são comumente encontrados nas panículas, e podem comprometer muito a qualidade das sementes. Nesse caso, o controle emergencial deve ser realizado antes que níveis drásticos sejam alcançados.

É importante lembrar que o manejo na hora correta, consorciado ao controle biológico, é uma ferramenta que reduz a necessidade de futuras aplicações. Assim, os gastos com controle e os riscos de intoxicação das plantas podem ser reduzidos. Um exemplo de risco de fitotoxicidade seria o uso de organofosforados, como clorpirifós, que pode causar atraso no desenvolvimento de algumas plantas, descompassando o *split*. O uso de tal produto não é vetado, mas deve ser realizado no momento correto, a fim evitar ao máximo os prejuízos aos campos de produção de sementes.

Roguing de Pré-Florescimento

O *roguing* se trata da eliminação de plantas atípicas (*off types*), fora dos padrões da cultivar em produção ou mesmo de outra espécie, que, portanto, não deveriam estar presentes no campo de produção de sementes. Dessa forma, é preciso eliminar estes contaminantes, que interferem diretamente na qualidade genética e pureza do lote de sementes. Durante o ciclo do sorgo deve-se realizar o *roguing* antes do florescimento, tanto nas fileiras de linhagem macho quanto nas fileiras de fêmeas, evitando o cruzamento da linhagem A com plantas atípicas.

Mutantes Altos

Os mutantes altos são aquelas plantas semelhantes à cultivar em produção, mas que apresentam de 30 a 60 cm a mais do que essas (Figura 15). Em geral essas apresentam constituição genética idêntica à dos parentais, mas, por alguma mutação, seu porte é muito superior ao das demais plantas. Os mutantes altos são os contaminantes de menor risco para os campos de produção, já que não comprometem a pureza genética das sementes, mas, ainda assim, devem ser eliminados.



Foto: Cicero Beserra Menezes

Figura 15. Presença de mutantes altos em lavoura de híbridos de sorgo granífero.

Plantas Graníferas

As plantas graníferas podem ser da mesma espécie da cultivar em produção, mas ainda assim representam contaminação, apresentando sementes de cor diferente, ou panículas com formatos distintos. Estas devem ser eliminadas mesmo que apresentem porte similar ao dos híbridos/variedades em produção. Possivelmente essas plantas são provenientes de campos de produção anteriores.



Foto: Elizete Carvalho, 2020. Sete Lagoas - MG

Figura 16. Contaminação por planta de sorgo de genótipo distinto ao das linhagens utilizadas no campo isolado.

Plantas Forrageiras

As plantas de sorgo forrageiro são consideradas contaminantes em campos de sementes de híbridos graníferos, por exemplo, apresentando 50 a 150 cm a mais do que os híbridos. O cruzamento desses contaminantes com plantas fêmeas pode causar um dano menor se os híbridos em produção forem para uso forrageiro, mas ainda assim é importante eliminá-los.



Foto: Cícero Beserra Menezes

Figura 17. Plantas de *Sorghum* sp. contaminantes de lavoura de híbridos comerciais de sorgo granífero.

Plantas Forrageiras Rizomatosas

Essas plantas forrageiras se propagam por meio de rizomas, oriundas de safras passadas, que sobreviveram no solo, mesmo após certo período sem irrigação. Apresentam porte alto, que ultrapassa os 2 m de comprimento, em média entre 50 e 150 cm maiores que os híbridos graníferos. Essas plantas atípicas apresentam muitos perfilhos, colmos finos, panícula aberta, folhas mais estreitas, sendo resultado do cruzamento de *Sorghum bicolor* ($2n=20$), dos campos em produção com *Sorghum halepense*, conhecido como capim massarambá ($2n=40$). Estas espécies apresentam número de cromossomos diferentes, resultando em um descendente estéril, ou com baixa produção de sementes. Sua eliminação é essencial para não comprometer a qualidade do lote de sementes, e também para não perpetuar a espécie indesejada nos campos de semente.



Foto: José A. S. Rodrigues

Figura 18. Plantas de sorgo selvagem.

Plantas Forrageiras Não Rizomatosas

O *Sorghum verticiliflorum* é um exemplo comum em áreas de lavoura de sorgo, que causa grandes problemas de contaminação. Suas plantas chegam aos 2,5 a 3,0 metros e produzem sementes rapidamente, atingindo a maturidade fisiológica. Ao caírem no chão, ocorre a germinação e um novo ciclo de infestação reinicia. A eliminação dessa espécie deve ser realizada de imediato, sendo obrigatória.

Plantas Daninhas Proibidas

Algumas espécies de plantas daninhas são proibidas em campos de produção de sementes, e sua presença mínima condena todo o lote de sementes. Algumas dessas são corda-de-viola (*Ipomea purpurea*, Lam.), amendoim-bravo ou leiteiro (*Euphorbia heterophylla*), feijão-miúdo (*Vigna unguiculata*), capim-massarambá (*Sorghum halepense*), arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.), e outras, que devem ser controlados no campo de sorgo semente.

Plantas Reversoras

As plantas reversoras aparecem entre as fileiras de linhagens fêmea, que deveriam apresentar macho-esterilidade, mas, no entanto, acabam se tornando férteis. Dessa forma, o cruzamento com o macho, da linhagem R, fica comprometido, sendo que assim vão existir no mesmo campo duas fontes doadoras de pólen. Além disso, ao invés de produzir o híbrido, o que vai acontecer com maior intensidade é a produção da própria fêmea. Isso compromete a pureza genética do híbrido, e, portanto, estas linhagens reversoras devem ser imediatamente eliminadas. Para evitar estes problemas, o *roguing* é realizado antes do florescimento, onde já é possível perceber plantas que irão produzir pólen entre as macho-estéreis. As anteras normais apresentam uma coloração mais amarelada (Figura 10), e as macho-estéreis possuem anteras pálidas ou amarelo-claras. É importante lembrar que a equipe que realiza essa supervisão dos campos de produção deve ser bem treinada e ter experiências anteriores com a cultura, para conseguir identificar corretamente o que deve ser eliminado e o que não deve.

Pré-Colheita

Roguing

O *roguing* de pré-colheita deve ser realizado quando as fileiras de macho já foram eliminadas, para evitar mistura durante a colheita das fileiras de fêmea. A operação de *roguing* é realizada nessa fase para retirar perfilhos verdes, doentes, panículas com segregação de cor, plantas fora do padrão de altura, plantas macho que ainda ficaram nas linhas, plantas de outras espécies, ou seja, tudo aquilo que não for a linhagem fêmea do híbrido em produção.

Umidade das Sementes

Durante a etapa que precede a colheita, deve-se observar a umidade das sementes fazendo amostragens a cada três dias a partir do momento em que as plantas atingirem 30% de umidade. Quando se inicia a amostragem, a irrigação já pode ser cortada, uma vez que as sementes se apresentam mais próximas da maturidade fisiológica. Para uma amostragem homogênea e acurada, deve-se caminhar 50 metros para o interior da área e retirar cinco amostras de plantas aleatórias, que sejam representativas da unidade, e distantes das linhas de macho. Ao escolher as panículas é importante coletar o meio dessas, já que existe em média uma diferença de 2% de umidade entre as pontas e o centro, lembrando que o florescimento e a granação se iniciam de cima para baixo (Androcíoli, 2014).

Dessecação do Campo de Sementes

A dessecação dos campos de produção de sementes deve ser realizada assim que se atinge a média de 18% a 20% de umidade, com um herbicida registrado para a cultura. A dosagem pode ser maior quando a população de plantas daninhas no campo for um pouco maior. A dessecação uniformiza a umidade da semente e maximiza a eficiência da colheita, que será procedida com menos impurezas. Pode-se usar o herbicida paraquat na dosagem de 1,5 a 2,5 L do produto comercial por hectare, quando as sementes estiverem com umidade inferior a 25% (Androcíoli, 2014). O uso de glyphosate pode reduzir a germinação das sementes, por este ser herbicida sistêmico.

Colheita e Beneficiamento de Sementes

Recepção

Quando o lote de sementes chega à recepção da Unidade de Beneficiamento de Sementes, o primeiro passo é a conferência da documentação, como nota fiscal e controle de colheita. Em seguida é feita a pesagem e retirada de amostras do lote para os testes de umidade, sementes quebradas, sementes ardidadas e impurezas.

Descarga

O processo de descarga das sementes deve ser cuidadoso, partindo do ponto da limpeza de todos os locais em que a semente irá passar. Este procedimento é realizado principalmente para evitar a contaminação de outras cultivares que passaram antes para moega, elevadores, fossos, transportadores, máquinas de pré-limpeza, secadores, classificadores, mesa densimétrica e outros locais que compõem a linha de beneficiamento.

Pré-Limpeza

Na pré-limpeza devem-se regular as peneiras para retirar impurezas grandes nelas, de 4,5 a 6,0 mm, e embaixo, utilizar peneira de 1,75 mm para retirar impurezas pequenas como sementes quebradas, pedaços de colmo, pedaços de panícula ou folhas secas. Esses materiais são separados das sementes e descartados em seguida.

Secagem

Para a secagem das sementes, primeiro é preciso carregar o secador estático, utilizando somente a ventilação deste. Após essa secagem é preciso ligar o aquecedor com temperatura de 34 °C, que chega aos 38 °C. É importante que os operadores desse processo tenham muita atenção com a temperatura, que fora desses limites pode acarretar em redução de vigor e germinação das sementes. Durante o processo de secagem, deve-se amostrar pelo menos duas vezes por turno na parte de cima e na parte de baixo do secador para determinar o grau de umidade, registrando os números no formulário de secagem. Desligar o aquecedor quando a umidade chegar entre 11% e 12%, desligando o ventilador somente uma hora após desligar o aquecedor para resfriar a massa de sementes.

Armazenamento

Após o processo de secagem, resfriamento e expurgo, as sementes estão prontas para serem armazenadas. As sementes ficam de cinco a 10 dias no expurgo, e em seguida são transportadas para o silo, onde serão armazenadas até o processo de beneficiamento.

Classificação e Beneficiamento

Antes da classificação, deve-se limpar a torre por onde as sementes devem passar, a fim de conferir a existência de materiais residuais. Na torre de classificação essas sementes são separadas em peneiras e enviadas ao controle de qualidade para conferir se a classificação das sementes foi realizada de forma correta.

Ensaque

O ensaque é o último passo do processo de armazenamento das sementes, que antes passam pelo processo de classificação para retirada de sementes ardidas, quebradas ou com impurezas. Durante esse processo as sementes passam por peneiras, e nessas são colhidas amostras para verificar padrões de germinação e vigor das sementes em canteiros. A exigência mínima para comercialização de sementes certificadas é de 80% de germinação e 98% de pureza física. Após essas avaliações, o ensaque é liberado, e essas sementes são acondicionadas em sacarias de 10 kg, que são envolvidas em plástico filme. A cada 45 dias essas sacarias devem ser expurgadas para conservar as sementes livres de agentes que possam danificá-las.

Recomendações Finais

A produção de sementes de sorgo é um processo complexo, e demanda uma equipe com conhecimento prático sobre a cultura. Os aspectos filotécnicos do sorgo, bem como as normas para a implantação e condução dos campos de sementes, devem ser respeitados para se obter os melhores resultados em termos de qualidade de sementes.

Foi visto neste capítulo que, desde a produção até o beneficiamento de sementes, existem várias etapas importantes, para que o máximo potencial genético das linhagens parentais seja expresso nos híbridos produzidos. A qualidade das sementes é o resultado final de um processo de implantação e condução bem-feita, que dará ao produtor a segurança legal para a comercialização e o lucro sob a produção, e satisfação para os agricultores que utilizarão as sementes, com garantia de qualidade genética e altas produtividades.

Referências

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] GRÃOS: safra 2019/20: décimo levantamento. Brasília, DF: Conab, v. 7, jul. 2020. 31 p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 4 ago. 2020.

ANDROCIÓLI, J. R. Sistema de produção de sorgo semente. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO MILHO E SORGO, 30., 2014, Salvador. **Eficiência nas cadeias produtivas e abastecimento global**: livro de palestras. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014.

AWIKA, J. M.; ROONEY, L. W. Sorghum phytochemicals and their potential aspects on human health. **Phytochemistry**, v. 65, n. 9, p. 1199-1221, 2004.

BERNARDINO, K. C. **Estudo genético dos mecanismos para eficiência no uso de fósforo em linhagens endogâmicas recombinantes de sorgo**. 2014. 73 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

BORÉM, A.; PIMENTEL, L.; PARRELLA, R. A. da C. (ed.). **Sorgo**: do plantio à colheita. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. 275 p.

BRASIL. Lei n. 10.711, de 5 de agosto de 2003. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudanças e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 6 ago. 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n. 9, de 2 de junho de 2005. Aprova as normas para produção, comercialização e utilização de sementes. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 jul. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Registro Nacional de Cultivares - RNC**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/guia-de-servicos/registro-nacional-de-cultivares-rnc>>. Acesso em: 2 jul. 2020.

CISNEROS-LÓPEZ, M. E.; ONOFRE, L. E. M.; GONZÁLES-HERNÁNDEZ, V. A.; ZAVALATA-MANCERA, H. A.; MORA-AGUILERA, G.; HERNÁNDEZ-MARTINES, M.; CÓRDOVA-TÉLLEZ, L. Synchronicity of pollination and inoculation with *Claviceps africana* and its effects on pollen-pistil compatibility and seed production in sorghum. **Fungal Biology**, v. 114, n. 4, p. 285-292, 2010.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 86).

MENEZES, C. B.; VIANA, P. A.; MENDES, S. M. **Sorgo granífero**: estenda sua safinha com segurança. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 65 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 176).

MORRIS, G. P.; RAMU, P.; DESHPANDE, S. P.; HASH, C. T.; SHAH, T.; UPADHYAYA, H. D.; RIERA LIZARAZU, O.; BROWN, P. J.; ACHARYA, C. B.; MITCHELL, S. E.; HARRIMAN, J.; GLAUBITZ, J. C.; BUCKLER, E. S.; KRESOVICH, S. Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 2, p. 453-458, 2013.

OLIVEIRA, I. C. M.; MARÇAL, T. M.; BERNARDINO, K. C.; RIBEIRO, P. C. O.; PARRELLA, R. A.; CARNEIRO, P. C. S.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, J. E. S. Combining ability of biomass sorghum lines for agroindustrial characters and multitrait selection of photosensitive hybrids for energy cogeneration. **Crop Science**, v. 59, p. 1554-1566, 2019.

PACKER, D. J.; ROONEY, W. L. High-parent heterosis for biomass yield in photoperiod-sensitive sorghum hybrids. **Field Crops Research**, v. 167, p. 153-158, 2014.

PARRA-LONDONO, S.; KAVKA, M.; SAMANS, B.; SNOWDON, R.; WIECKHORST, S.; UPTMOOR, R. Sorghum root-system classification in contrasting P environments reveals three main rooting types and root-architecture-related marker-trait associations. **Annals of Botany**, v. 121, n. 2, p. 267-280, 2018.

QUEIROZ, V. A. V.; MORAES, E. A.; MARTINO, H. S. D.; PAIVA, C. L.; MENEZES, C. B. Potencial do sorgo para uso na alimentação humana. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 278, p. 7-12, 2014.

REDDY, B. V. S.; RAMESH, S.; ORTIZ, R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in sorghum. In: JANICK, J. (ed.). **Plant breeding reviews**. New York: John Wiley & Sons, 2005. p. 139-172.

RIBAS, P. M. Importância econômica. In: RODRIGUES, J. A. S.; VERSIANI, R. P.; FERREIRA, M. T. R. (ed.). **Cultivo do sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 2).

RIBEIRO, P. C. O.; MARÇAL, T. S.; OLIVEIRA, I. C. M.; SCHAFFERT, R. E.; CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, A. B.; PARRELLA, R. A. C. Insight into genetic potential of male sterile sweet sorghum A-lines for agroindustrial traits using tester R-lines. **Industrial Crops and Products**, v. 153, article 112577, 2020.

SCHAFFERT, R. E.; RODRIGUES, J. A. S. Fluxo gênico em sorgo. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. (ed.). **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. cap. 26, p. 279-299.

SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A. **Sorghum**: origin, history, technology, and 623 production. New York: John Wiley & Sons, 2000.

UNITED STATES. Department of Agriculture. **FoodData central**. Washington, 2020. Database for standard reference. Disponível em: <<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/list>>. Acesso em: 2 jul. 2020.

UTINO, S.; FERNANDEZ-FRANCO, D.; COSTA, S. V.; MAGALHÃES, A. M.; PETERS, V. J.; SILVA, M. G. Produção de sementes. In: EMBRAPA. **Ageitec**: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 2 jul. 2020.

Literatura Recomendada

FAO. **FAOSTAT**: production crops. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC>>. Acesso em: 3 ago. 2020.

REIS, B. L.; TOMAZ, P. A.; OLIVEIRA, D. S.; QUEIROZ, V. A. V.; MARTINO, H. S. D.; TARDIN, F. D.; SANT'ANA, H. M. P. Determinação dos isômeros da vitamina e em oito variedades de farinha de sorgo (*Sorghum bicolor*). In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO, 19; SIMPÓS - MOSTRA CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO, 9.; SIMPÓSIO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 7; SIMPÓSIO DE ENSINO, 3., 2009, Viçosa. [Anais]. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009

MUTISYA, J.; SUN, C.; ROSENQUIST, S.; BAGUMA, Y.; JANSSON, C. Diurnal oscillation of sbe expression in sorghum endosperm. **Journal of Plant Physiology**, v. 166, p. 428-434, 2009.

Capítulo 18

Regulamentação para produção de sementes de sorgo

Crislene Vieira dos Santos
Isadora Cristina Martins Oliveira
Ruane Alice da Silva
Pedro César de Oliveira Ribeiro
Cícero Beserra de Menezes
Karla Jorge da Silva

Introdução

A produção de sementes nos programas de genética e melhoramento de plantas tem como finalidade principal a obtenção de genótipos com maior produtividade e rentabilidade financeira. Porém, existem outros objetivos gerais intrínsecos à produção de sementes, como a qualidade sanitária, a qualidade fisiológica e a pureza física e genética, que são normas regulamentadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa).

Seguir os parâmetros regulatórios estabelecidos pelo Mapa se torna, então, tarefa essencial durante as etapas de multiplicação e produção de sementes genéticas, até a formação das sementes que serão comercializadas. Com isso, a produção de sementes dá continuidade aos programas de melhoramento, e deve seguir os caminhos da pesquisa de produção até a colheita, o beneficiamento e o controle de qualidade.

No processo de produção de sementes, seis categorias de sementes podem ser sintetizadas, sendo elas: genética, básica, certificada de primeira geração (C1), certificada de segunda geração (C2), não certificada de primeira geração - S1 e não certificada de segunda geração - S2 (Figura 1). A semente genética é o material de reprodução obtido pelo processo de melhoramento de plantas, produzida e comercializada por produtores de semente inscritos no Registro Nacional de Sementes e Mudas (Renasem). As sementes básicas, por sua vez, são obtidas da reprodução das sementes genéticas, a fim de garantir a identidade genética e pureza varietal. As sementes certificadas de

primeira geração (C1) são resultantes da reprodução de semente genética ou de semente básica, e as de segunda geração (C2) são resultantes da reprodução de semente genética, de semente básica ou de semente C1. Já as sementes S1 e S2 não são certificadas. A S1 pode ser obtida por meio da reprodução de sementes genéticas, básicas ou sementes C1 e C2, e a S2 pode ser produzida a partir da multiplicação de todas as demais categorias, ou são originárias de materiais sem origem genética comprovada, avaliados anteriormente, dadas normas específicas estabelecidas pelo Mapa para determinadas espécies.

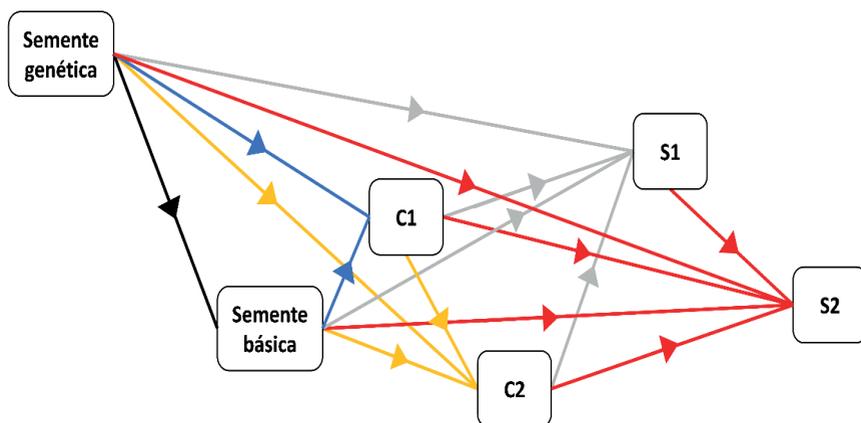


Figura 1. Fluxograma de categorias de sementes. Semente genética, semente básica, certificada de primeira geração - C1; certificada de segunda geração - C2; não certificada de primeira geração - S1 e não certificada de segunda geração - S2

Basicamente, todos os lotes de sementes a serem multiplicadas devem atender aos seguintes aspectos: ter origem conhecida, alta pureza genética, alta qualidade sanitária e boa qualidade fisiológica, ser livre de sementes de plantas daninhas e de material inerte. Com isso, garantem-se confiabilidade e padrão de qualidade da semente, até o produto chegar ao consumidor final.

Normas Básicas para Produção de Sementes

Quando se pensa na produção de sementes, a primeira diretriz a ser seguida é a Lei de Sementes e Mudanças. A Lei nº 10.711, de 05 de agosto de 2003 (Brasil, 2003) junto com o Decreto nº 10.586, de 18 de dezembro de 2020 (Brasil, 2020), a Instrução Normativa nº 9 de 02 de junho de 2005 (Brasil,

2005) e a Instrução Normativa nº 45 de 17 de setembro de 2013 (Brasil, 2013) constituem o sistema normativo para a produção, comercialização e utilização de sementes no Brasil.

Para a instalação do campo de sementes, o prazo máximo para inscrição do campo no Mapa é de 30 dias após o plantio. Esta informação é muito importante para o produtor, que precisa seguir os prazos para ter sua inscrição aprovada pelo Ministério.

De fato, a legalização de qualquer atividade é sempre o maior alvo de dúvidas e erros, que neste caso podem resultar em prejuízos incalculáveis para aqueles com o objetivo de produzir sementes regulamentadas. Com isso, para iniciar o processo como pessoa física ou jurídica a fim de produzir sementes, a parte interessada deve se inscrever no Registro Nacional de sementes e Mudanças (RenaseM). O RenaseM é um registro único, instituído pelo Mapa, que tem como finalidade a habilitação de pessoas físicas ou jurídicas para a execução de diretrizes da atividade sementeira. Estas atividades, previstas na Lei nº 10.711, de 2003, no Decreto nº 10.586, de 2020, e nas normas complementares, estão relacionadas aos processos de produção, beneficiamento, amostragem, certificação, análise, armazenamento, comercialização de sementes e mudas, além de atividades de responsabilidade técnica.

Para a produção de sementes de sorgo, assim como de outras culturas, é obrigatória a contratação de um Responsável Técnico (RT), profissional capacitado para conduzir os campos de produção, assim como a vinculação do produtor a alguma entidade certificadora, exceto para a produção de sementes S1 e S2. É necessário ainda um laboratório de análise de sementes.

De acordo com o anexo XXIV da Instrução Normativa nº 45 de setembro de 2013 é preciso seguir os padrões mínimos para produção e comercialização de sementes de sorgo híbrido ou variedade. Essas diretrizes devem ser respeitadas pelos produtores de sementes, que têm seus campos inspecionados por órgãos competentes, a fim de assegurar um produto autêntico aos agricultores e consumidores finais.

Inspeção de Campos de Sementes

A inspeção dos campos de produção de sementes é um passo importante para a obtenção de qualidade de sementes em relação a sua pureza física, pureza genética, qualidade fisiológica e qualidade sanitária. O objetivo principal das inspeções é examinar o cumprimento das normas

e padrões estipulados pelo Mapa, que mudam de acordo com cada cultura. As inspeções oficiais dos campos de produção são realizadas por um fiscal do Mapa, e também pelo RT do produtor ou do certificador. Neste caso, são verificados na Tabela 1 alguns principais pontos normatizados para a inspeção de campos de produção de sementes para variedades, e padrão de campo para produção de híbridos, na Tabela 2.

Tabela 1. Padrão de campo de produção de sementes de variedades.

4 Parâmetros de campo		Categorias/índices			
		Básica	C1	C2	S1 e S2
4.1	Vistoria				
	Área máxima de gleba (ha)	50	100	100	100
	Número mínimo ⁵	2	2	2	2
	Número mínimo de subamostras	6	6	6	6
	Número de plantas por subamostra	1000	1000	750	500
	População da amostra	6000	6000	4500	3000
4.2	Rotação (ciclo agrícola)	-	-	-	-
4.3	Isolamento (metros)				
	Cultivares do mesmo grupo	300	300	300	300
	Cultivares de grupos diferentes	600	600	600	600
	Capim-Sudão (<i>Sorghum sudanense</i> L)	1500	1500	1500	1500
	Capim-massarambá (<i>Sorghum halepense</i> L)	1500	1500	1500	1500
	Campo-de-boi (<i>Sorghum verticilliflorum</i> L)	1500	1500	1500	1500
	Número mínimo de fileiras de bordadura	-	-	-	-
Isolamento por diferença de época de plantio	-	-	-	-	
4.4	Plantas atípicas (fora do tipo) (n° máximo de plantas)				
	Do mesmo grupo	3/6000	6/6000	6/4500	6/3000
	Grupo diferente	0/6000	1/6000	1/4500	1/3000

Continua...

Tabela 1. Continuação

4 Parâmetros de campo					
		Categorias/índices			
		Básica	C1	C2	S1 e S2
4.5	Plantas de outras espécies				
	Outra espécie de sorgo	0/6000	0/6000	0/4500	0/3000
	Cultivadas/silvestres/nocivas toleradas	-	-	-	-
	Nocivas proibidas	-	-	-	-

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Tabela 2. Padrão de campo de produção de sementes de híbridos.

Vistoria		Híbridos	
4.1	Área máxima da gleba (ha)	50	100
	Número mínimo ²	2	2
	Número mínimo de subamostras	6	6
	Número de plantas por subamostra	1000	1000
	População da amostra	6000	6000
	4.2	Rotação (ciclo agrícola)	-
4.3	Isolamento (metros)		
	Cultivares do mesmo grupo	300	300
	Cultivares de grupos diferentes	600	600
	Capim-Sudão (<i>Sorghum sudanense</i> L)	1500	1500
	Capim-massarambá (<i>Sorghum halepense</i> L)	1500	1500
	Campo-de-boi (<i>Sorghum verticiliflorum</i> L)	1500	1500
	Número mínimo de fileiras de bordadura	-	-
	Isolamento por diferença de época de plantio	-	-
4.4	Plantas atípicas (fora do tipo) (nº máximo de plantas)		
	Do mesmo grupo	3/6000	6/6000
	Grupo diferente	0/6000	1/6000
4.5	Plantas liberadoras de pólen nas fileiras fêmeas (nº máximo)	3/6000	6/6000
4.6	Plantas de outras espécies		
	Outra espécie de sorgo	0/6000	0/6000
	Cultivadas/silvestres/nocivas toleradas	-	-
	Nocivas proibidas	-	-

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

- A área de implantação do campo de produção de sementes de sorgo não

deve ter histórico de pragas de solo, plantas de sorgo selvagem ou plantas de sorgo remanescentes de plantios anteriores.

- O número de linhas de bordaduras, quando for o caso, deve ser igual ao recomendado.
- As bordas, linhas e entrelinhas devem estar limpas, sem a presença de plantas daninhas de difícil controle e potencialmente capazes de reduzir a qualidade das sementes.
- O campo de produção deve apresentar uniformidade entre as plantas, mostrando que as linhagens progenitoras apresentam homozigose.
- Todos os tratos culturais devem ser realizados, de acordo com as recomendações para a cultura do sorgo.
- A colheita deve ser realizada na época correta e após a eliminação das plantas macho, no caso de híbridos, para evitar a mistura mecânica das sementes.

Na cultura do sorgo são realizadas no mínimo quatro inspeções nos campos de produção de sementes, que compreendem os períodos de pós-emergência da cultura, floração, pré-colheita e durante a colheita (Figura 2). A inspeção pós-emergência do sorgo é realizada entre a emergência das plântulas, até os estágios que precedem o florescimento. E tem como finalidade verificar o desenvolvimento inicial das plântulas, a presença de contaminantes, presença de plantas atípicas, e o padrão de isolamento no tempo e na distância com outros campos de produção de sementes ou lavouras de produção de grãos. Para campos próximos a áreas com mesmo grupo de cultivares de sorgo, também se deve aferir o número de bordaduras, a fim de garantir uma distância mínima de isolamento.

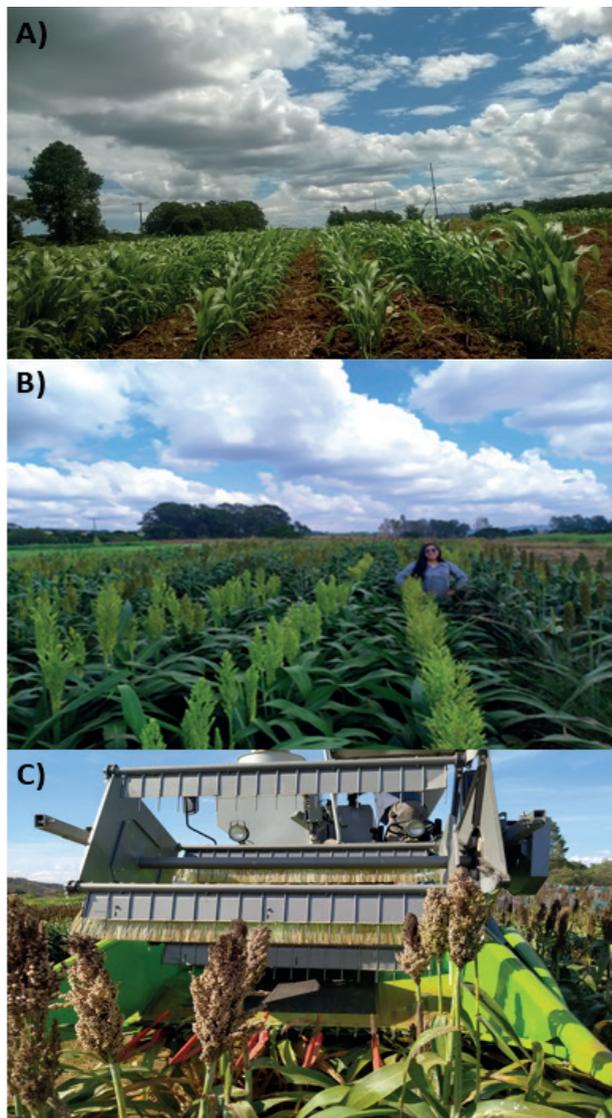


Foto: Crislene Vieira dos Santos

Figura 2. Períodos de inspeções nos campos de produção de sementes de sorgo, durante a pós-emergência (A), florescimento (B) e colheita (C).

A floração é o período mais crítico dos campos de produção de semente, uma vez que o risco de contaminação é maior nessa época. Assim,

o fiscal deve verificar a presença de contaminantes e orientar a prática do *roguing*, caso necessário, principalmente entre e nas fileiras de progenitores, no caso de híbridos. Quaisquer plantas, daninhas ou mesmo plantas de sorgo que não estejam no padrão dos parentais do híbrido ou variedade em produção, devem ser eliminadas dos campos de produção de sementes.

Os tipos de contaminantes podem ser classificados como plantas atípicas, plantas polinizadoras nas linhas de progenitor feminino, plantas de outras espécies cultivadas, e plantas invasoras, que são de difícil separação durante o beneficiamento. No sorgo, as plantas atípicas são aquelas da mesma espécie, mas que se diferem do padrão das plantas da cultivar que se está multiplicando ou dos progenitores para o caso de cultivares híbridas. Estas se diferenciam quanto à ramificação e forma da panícula, coloração das sementes, porte das plantas, presença de pólen, ciclo, dentre outras características da cultura. Elas podem ser atípicas polinizadoras (fora do tipo que libera pólen) ou podem ser a própria linhagem feminina. Neste último caso, se consideram plantas polinizadoras item 4.5 do padrão. Deve-se eliminar também contaminantes de outras espécies de sorgo, como o *Sorghum sudanense*, *Sorghum halepense* e *Sorghum verticilliflorum*.

Na fase de pré-colheita são realizadas outras inspeções, para verificar a presença de contaminantes e adoção de medidas corretivas, para assegurar a limpeza dos campos. Para isso, o *roguing* deve ser procedido, a fim de eliminar as plantas atípicas, por exemplo, plantas com cor de grão diferente dentro da fêmea.

Na Tabela 3 são especificadas as proporções máximas permitidas para cada tipo de planta atípica, dentro de cada categoria de semente. Informações sobre vistorias e amostragem se encontram na Tabela 3.

Tabela 3. Número máximo de plantas atípicas, da mesma espécie ou de espécie diferente da cultivar produzida.

Tipos de plantas atípicas	Básica	C1	C2	S1 e S2
Mesmo grupo*	3/6.000	6/6.000	6/4.500	6/3.000
Grupos diferentes**	0/6.000	1/6.000	1/4.500	1/6.000
Outras espécies de Sorgo	0/6.000	0/6.000	0/4.500	0/6.000

*Grupo: Cultivar granífera; **Forrageiro e vassoura que não seja aquele produzido.

É importante frisar que do lote de sementes são coletadas amostras, submetidas a análises de identidade e qualidade, e mediante esses testes é feita a aprovação ou não do lote.

Os parâmetros de campo para produção de sementes de híbridos de sorgo são bastante semelhantes aos dos campos de produção de variedades. Contudo, as diferenças devem ser ressaltadas, para reduzir o equívoco dos padrões, que são fiscalizados rigorosamente. Não conhecer essas diferenças pode ser de alto risco, e resultar em não conformidades.

A primeira diferença é que, na produção de sementes de híbridos, existem apenas três categorias de sementes, sendo elas básica, C1 e S1. Assim como nos campos de produção de variedades, e em campos de cultivares híbridas, devem ser realizadas pelo menos duas vistorias, e realizadas seis subamostras de plantas, por ocasião das vistorias, para verificar a presença de contaminantes. Informações sobre vistorias e amostragem se encontram na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de campo para a vistoria em campos de produção de sementes de híbridos de sorgo.

Parâmetros exigidos	Básica	C1	S1
Área máxima da gleba (ha)	50	100	100
Número mínimo de vistorias	2	2	2
Número mínimo de subamostra	6	6	6
Número de plantas por subamostras	1.000	1.000	500
População da amostra	6.000	6.000	3.000

Obs.: As vistorias devem ser realizadas nas fases de floração e pré-colheita.

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Isolamento

De acordo com a Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013 (anexos XXIV e XXV), implementada pelo Mapa, as áreas de produção de sementes devem obedecer ao isolamento mínimo a fim de evitar a contaminação por pólen de outros campos cultivados ou espécies de sorgo. Os parâmetros para a produção de sementes básicas, certificadas e não certificadas de híbridos e variedades de sorgo, seguem diretrizes

específicas que serão abordadas neste capítulo. Para tal, este isolamento pode ser realizado por distâncias entre campos (Tabela 5) ou por tempo (diferentes datas de plantio), de maneira que não ocorra a coincidência do florescimento entre os campos distintos.

Tabela 5. Padrões de isolamento em metros para a produção de sementes de sorgo (Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013, anexos XXIV e XXV, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento).

Parâmetros para sementes básicas, certificadas e não certificadas (híbridos e variedades)	Distância mínima (Metros)
Cultivares de mesmo grupo	300
Cultivares de grupos diferentes	600
Capim-Sudão (<i>Sorghum sudanense</i>)	1.500
Capim-massarabá (<i>Sorghum halepense</i>)	1.500
Capim-de-boi (<i>Sorghum verticilliflorum</i>)	1.500

Fonte: Brasil (2013).

O processo de regulamentação está contido em todas as etapas de desenvolvimento da cultura e mesmo antes de sua implantação, com o cadastro e a liberação do produtor pelo Renasem, como já foi abordado. Em seguida, o próximo passo é a escolha da área para o plantio do campo de sementes pelo produtor. Para isso, existem cinco principais parâmetros e espécies de plantas que apresentam maior risco de contaminação para os campos de sementes de sorgo, listados de acordo com a Tabela 5. O primeiro parâmetro, de menor risco, é a presença de cultivares de mesmo grupo. Neste caso, temos como exemplo dois campos de produção de híbridos ou variedades, que devem estar a uma distância mínima de 300 metros. Mesmo sendo da mesma espécie, os riscos de contaminação mútua são grandes, dada a alta dispersão do pólen pelo vento.

O rigor aumenta quando se trata de grupos diferentes de sorgo. Neste caso, um campo de produção de híbridos ou variedades de sorgo granífero deve estar distante em, no mínimo, 600 metros de um campo de produção de variedades forrageiras, o que também se aplica aos híbridos granífero x híbridos forrageiros. A mistura entre grupos diferentes e mesmo entre sorgos de outras espécies fica mais fácil de ser identificada nos híbridos, deixando-os fora do padrão de plantas, principalmente. Dessa forma, ambos os campos de produção estarão comprometidos.

As distâncias mais rígidas são de 1.500 metros em relação ao capim-Sudão, capim-de-boi, e capim-massambará. Apesar de pertencerem a outras espécies do gênero *Sorghum*, apresentam altas chances de contaminação, pela recombinação (cruzamento) com as linhagens fêmeas (macho-estéreis) produtoras de sementes híbridas. Neste caso, a distância aumenta consideravelmente por causa da alta capacidade de dispersão do pólen e/ou de sementes. Dessa forma, deve-se tomar mais cuidados e respeitar as distâncias exigidas, a fim de reduzir o risco de contaminação do campo de produção de sementes por essas espécies indesejadas.

A legislação permite certas alterações das distâncias entre campos, por meio de alguns procedimentos, como o uso de bordaduras. As bordaduras são utilizadas como barreiras físicas entre campos de produção de sementes, quando não é possível o atendimento da distância mínima (300 m) estabelecida para o isolamento entre áreas de mesmo grupo de cultivares de sorgo, sendo necessárias no mínimo 18 fileiras de bordadura nos lados em que há fonte de contaminação (Tabela 6).

Tabela 6. Número de fileiras de bordadura exigidas para campos de produção, com plantas do mesmo grupo de cultivares, de acordo com a Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013 (anexos XXIV e XXV), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Distância mínima de outra cultivar (m)	Número de fileiras de bordadura
300	0
250 – 299	4
200 – 249	6
175 – 199	8
150 – 174	10
125 – 149	12
100 – 124	14
75 – 99	16
50 – 74	18
< 50	não permitido

Fonte: Brasil (2013).

Essas bordaduras podem ser compostas pela mesma linhagem R (produtora de pólen), utilizada como parental masculino do campo de produção de híbridos, ou pela própria variedade, no caso de campos de

produção de variedades. O uso de bordaduras ocorre quando se deseja produzir duas cultivares distintas em campos de produção localizados a no mínimo 50 metros de distância. Vale ressaltar que as linhas de bordadura são colhidas e descartadas antes da colheita das cultivares nos campos de produção de sementes.

Outra estratégia complementar é o isolamento por tempo. Para isso se deve programar os plantios, de acordo com o ciclo dos parentais ou cultivar usados, para que ocorra uma diferença de no mínimo 30 dias entre as datas de florescimento dos dois campos de produção. O isolamento por tempo é eficiente no caso de áreas irrigadas por pivô central, pois otimiza a utilização da área de cultivo com mais de um campo de produção por pivô.

Inspeção de Florescimento

O período de florescimento é caracterizado pela abertura das flores, quando os estigmas (parte feminina) se encontram receptivos e as anteras liberam pólen viáveis. Além disso, considera-se como florescimento pleno quando 50% das plantas da unidade experimental estão florescidas, sendo este o momento correto para a inspeção.

A inspeção no florescimento é um dos momentos mais importantes, por ser uma das etapas com maior possibilidade de contaminação. Isto acontece porque o pólen pode se disseminar por mais de 100 m, através do vento. Dessa forma, a fim de reduzir os riscos de contaminação, plantas atípicas devem ser retiradas antes do florescimento, por riscos altos de fecundação cruzada.

Apesar de o sorgo ser uma planta considerada por alguns como autógama, descreve-se hoje na literatura que o sorgo pertence ao grupo de plantas mistas. Ou seja, o sorgo não se encaixa nos padrões de autógamas por apresentar, em certos casos, uma taxa de alogamia maior do que 5%. Alguns fatores que podem interferir nessa alteração nas taxas de fecundação cruzada são altitude e calor. Desse modo, os campos de produção de sementes de sorgo devem ser bem isolados para evitar esses possíveis focos de contaminação.

Inspeção Pré e Pós-Colheita

O Registro Nacional de Cultivares (RNC) possibilita a produção e comercialização de sementes, mediante registro de uma determinada cultivar. Para esse registro é necessário o cumprimento das exigências estabelecidas

pelo Mapa. Essas exigências são determinadas pela IN nº 45, de 17 de setembro de 2013. As normas devem ser seguidas desde antes da instalação das lavouras, durante o desenvolvimento da cultura do sorgo, e mesmo após a colheita, em que são realizadas verificações nas sementes produzidas. Estes padrões para a produção de sementes de sorgo influenciam diretamente na possibilidade de comercialização dessas sementes ao fim do ano agrícola.

Na Tabela 7 são apresentados os padrões para produção e comercialização de sementes de sorgo, considerando um lote com peso máximo de 30.000 quilos. Para tal são retiradas amostras simples para formar uma amostra composta, representativa do lote, conforme IN 09, item 18, que é amostra submetida de 900 g. Esta amostra é enviada ao Laboratório de Análise de Sementes (LAS). No LAS, a amostra será dividida em subamostras de trabalho para realização dos testes, conforme a Regra de Análise de Sementes (RAS). E a quantidade de sementes retiradas, em quilos, é diferente entre os grupos *S. bicolor* e *S. bicolor* x *S. sudanense*, como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 7. Peso mínimo de amostra (g) para produção e comercialização de sementes de sorgo (híbridos e variedades), com base em peso máximo do lote de 30.000 kg.

Grupos	Amostra submetida ou média
<i>S. bicolor</i> (L.) Moench	900
<i>S. bicolor</i> (L.) Moench x <i>S. sudanense</i> (Piper) Stapf	500

Obs.: Prazo máximo para solicitação da inscrição de campos (dias após o plantio): 30 dias
Fonte: adaptado de Brasil (2013).

De forma geral, estas amostras são utilizadas para análise de identidade e qualidade, cujo resultado dará subsídio para tomada de decisão em aprovar ou não o lote de sementes.

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros de campo para produção de sementes de variedades de sorgo. Para cada categoria de semente, há um parâmetro de amostragem, vistoria, e população que o campo de produção deve seguir para estar de acordo com as normas. Estas vistorias e coletas são geralmente realizadas nas fases de floração e pré-colheita, que são períodos com maior chance de detectar contaminantes. Neste caso são utilizados os parâmetros área máxima da gleba (ha), número mínimo de vistorias, número

mínimo de subamostras, número de plantas por subamostras e população da amostra.

Para o campo de produção de sementes, de quaisquer categorias, a área máxima da gleba, que é a área total de amostragem para as demais análises, deve ser de no máximo 50 hectares. Dentro dessa área deverão ser realizadas pelo menos duas vistorias, e coletadas seis subamostras de plantas. Cada subamostra deve conter 1.000 plantas, chegando a uma população de 6.000 plantas.

Tabela 8. Parâmetros de campo para a vistoria em campos de produção de sementes de variedades de sorgo.

Parâmetros exigidos	Básica	C1	C2	S1 e S2
Área máxima da gleba (ha)	50	100	100	100
Número mínimo de vistorias	2	2	2	2
Número mínimo de subamostra	6	6	6	6
Número de plantas por subamostras	1.000	1.000	750	500
População da amostra	6.000	6.000	4.500	3.000

Obs.: As vistorias devem ser realizadas nas fases de floração e pré-colheita, sendo essas obrigatórias.

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Os percentuais aceitáveis de pureza são de 98% para todas as classes de sementes (Tabela 9). Dentre estes materiais inertes não são consideradas sementes de outras espécies, que devem ser contabilizadas de acordo com procedimentos estabelecidos pelos RAS. O número máximo de outras sementes corresponde a 0,1% da amostra total para sementes C1, C2, S1 e S2, e de 0% para as sementes básicas.

A Tabela 10 discrimina o parâmetro "outras sementes", contido na Tabela 9. Neste caso, outras sementes encontradas no lote podem ser de outras espécies cultivadas, sementes silvestres, sementes nocivas toleradas e sementes nocivas proibidas. As sementes nocivas toleradas são aquelas de espécies cuja presença junto às sementes da amostra é permitida dentro de limites máximos, específicos e globais, fixados em normas e padrões estabelecidos. Já as sementes proibidas e nocivas são aquelas cuja presença não é permitida junto às sementes do lote, conforme normas e padrões

estabelecidos. E as sementes nocivas pertencem às espécies que, por serem de difícil erradicação no campo ou de remoção no beneficiamento, são prejudiciais à cultura ou ao seu produto, sendo limitadas conforme normas e padrões estabelecidos.

Tabela 9. Parâmetros de pureza das amostras de sementes de variedades em sorgo.

Parâmetros de qualidade	Básica	C1	C2	S1 e S2
Semente Pura (% mínima)	98,0	98,0	98,0	98,0
Material Inerte (%)	-	-	-	-
Outras Sementes (% máxima)	0,0	0,1	0,1	0,1

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Tabela 10. Determinação do número máximo de sementes de outras espécies para campos de produção de variedades.

Tipos de sementes	Básica	C1	C2	S1 e S2
Semente de outra espécie cultivada	0	0	1	1
Semente silvestre	0	1	1	1
Semente nociva tolerada	0	1	2	3
Semente nociva proibida	0	0	0	0
Germinação (% mínima)	70	80	80	75
Validade do teste de germinação*	12	12	12	12
Validade da reanálise do teste de germinação*	8	8	8	8

* As validades de análise e reanálise são determinadas em meses.

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Nas amostras de sementes básicas, nenhuma dessas sementes contaminantes deve estar presente. De forma geral, as sementes nocivas proibidas são excluídas de todas as categorias de sementes, porém são permitidas algumas sementes nocivas nas categorias C1, C2, S1 e S2, conforme apresentado na Tabela 10. Além disso, o padrão de germinação mínimo para todas as categorias de sementes deve estar entre 70% e 80%, dependendo da categoria. A validade do primeiro teste de germinação é de 12 meses, e a validade de reanálises é de oito meses.

Os parâmetros de pureza para produção de híbridos seguem as mesmas diretrizes dos campos de produção de variedades. E consta que a pureza das amostras deve ser de 98% para todas as categorias. Outras sementes não são

permitidas nas amostras de sementes básicas, e um percentual de 0,1% é aceito para as demais classes.

A determinação do número máximo de sementes de outras espécies, apresentada na Tabela 11, mostra que, para os campos de produção de sementes básicas de híbridos, assim como na produção de variedades, não é admissível a presença de sementes de outras espécies cultivadas, silvestres, nocivas toleradas ou nocivas proibidas. Para sementes C1 e S1 é permitida a presença mínima de uma e duas sementes de outras espécies e de sementes silvestres, respectivamente. No caso de sementes nocivas são permitidas duas e três sementes na amostra, para C1 e S1, respectivamente. Já as sementes nocivas proibidas não devem estar presentes nas amostras e no lote de sementes, sob nenhuma circunstância. Além disso, as amostras de sementes dos híbridos devem apresentar no mínimo 70% de taxa de germinação para as sementes básicas, 80% para C1 e 75% para S1, sendo de 12 meses a validade do primeiro teste de germinação, e de oito em oito meses deve ser feita a reanálise, conforme Anexos XXIV e XXV da norma.

Tabela 11. Determinação do número máximo de sementes de outras espécies para campos de produção de híbridos.

Tipos de sementes	Básica	C1	S1
Semente de outra espécie cultivada	0	1	2
Semente silvestre	0	1	2
Semente nociva tolerada	0	2	3
Semente nociva proibida	0	0	0
Germinação (% mínima)	70	80	75
Validade do teste de germinação*	12	12	12
Validade da reanálise do teste de germinação*	8	8	8

Obs.: As validades de análise e reanálise são determinadas em meses.

Fonte: adaptado de Brasil (2013).

Procedimentos Gerais de Inspeção

Cada espécie de planta cultivada possui procedimentos específicos para inspeção, porém, alguns requisitos são comuns para todas. Seguem abaixo alguns desses requisitos, especificados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Gregg et al., 2011):

1. Devem ser realizadas no mínimo três inspeções, de acordo com os estágios fenológicos do sorgo, como em pós-emergência, florescimento, em pré-colheita e pós-colheita.
2. O fiscal deve verificar se o campo está na localização correspondente às indicadas no georreferenciamento que consta na inscrição do campo.
3. O produtor de sementes e seu Responsável Técnico (RT) deverão acompanhar o fiscal durante toda a inspeção do campo.
4. Durante a certificação das sementes pelo órgão regulador, o produtor e o responsável técnico também devem acompanhar a inspeção.
5. Os fatores observados no campo, e que constarão no laudo de inspeção, deverão ser mostrados ao produtor e ao seu responsável técnico.
6. Além de todos os parâmetros de isolamento, e ausência de plantas proibidas, o campo deve apresentar condições para inspeção. O acamamento das plantas pode ser um fator que caracteriza falta de condições para inspeção do campo de sementes.
7. O número mínimo de amostras deve ser seis, e para a coleta delas devem ser tomados os princípios de aleatoriedade e casualidade.
8. No momento da inspeção, mesmo percebendo que o campo de produção não atingirá os padrões estabelecidos, o fiscal deve continuar a inspeção, tomando as amostras.
9. A contagem de plantas pode ser iniciada em qualquer direção, desde que seja feita de maneira aleatória. Assim, o caminhamento pode ser realizado de diversas maneiras. Dois exemplos de caminhamento são apresentados na Figura 3.
10. Fileiras vazias ou falhas nas fileiras não devem ser consideradas como subamostras.
11. Cada uma das no mínimo três inspeções deve ser iniciada de um ponto diferente do campo.
12. Se durante o percurso de inspeção o responsável técnico ou representante da entidade certificadora observar plantas contaminantes fora da área das subamostras, deve-se fazer o registro separado desses contaminantes, e deve ser informado ao produtor, que pode remover essas plantas para fora do campo. Contudo, uma nova inspeção deve ser realizada em outro

momento, para verificar se ainda há vestígios de plantas contaminantes. No entanto, isso depende da espécie contaminante, e do período de inspeção, sendo mais considerada essa medida nas inspeções realizadas antes do florescimento, por causa do maior risco de contaminação neste estágio.

13. A amostragem pode ser refeita, caso haja dúvida sobre o procedimento.
14. O inspetor, ao fim da vistoria, deve coletar a assinatura de quem o acompanhou.
15. Caso o produtor ou acompanhante se negue a assinar o laudo, este fato deve ser relatado no próprio laudo.

Caminhamento nos Campos de Sementes

O caminhamento para inspeção pode ser iniciado de qualquer direção ou local na área do campo. Para isso alguns tipos de caminhamento são mais utilizados, de forma que não sejam repetidas amostras de plantas. Dois destes são mostrados na Figura 3, como o modelo de percurso em “X” e o modelo em diamante.

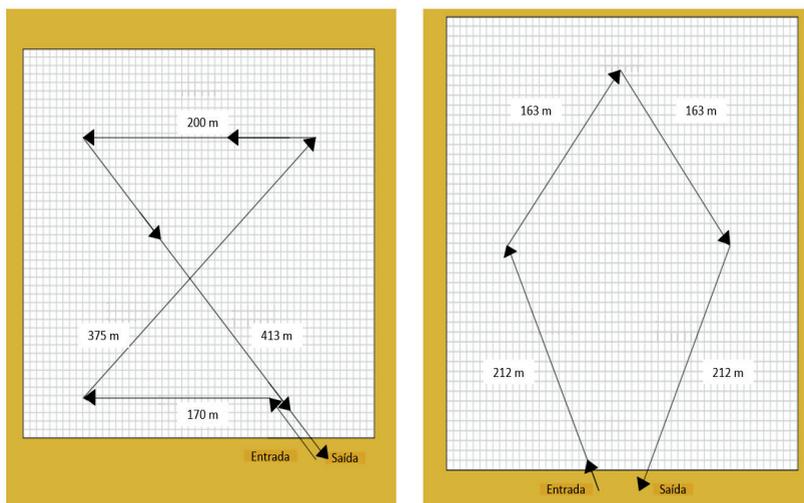


Figura 3. Modelos de percurso em “X” (esquerda) e modelo “diamante” (direita) para inspeção de produção de sementes em área de 12 hectares, de forma retangular. As amostras podem ser retiradas nos vértices do caminhamento.

Fonte: Gregg et al. (2011).

Os caminhamentos podem ser realizados das mais diversas maneiras, desde que atendam aos procedimentos para localização das subamostras aleatórias, para que não haja tendenciosidade nos resultados das amostras. Dessa forma, as amostras podem ser coletadas em pontos específicos ou seguindo os vértices do caminhamento.

Conclusões

Neste capítulo vimos considerações a respeito do processo de regulamentação para a produção de sementes e a importância de cumprir as especificações. Acordando com o procedimento legal, o produtor de sementes garante a qualidade e a confiabilidade de suas sementes, o que possibilita a expansão de seu mercado.

É importante ressaltar que o processo burocrático não é simples, mas é essencial para a conformidade dos lotes de sementes a serem produzidos. Contudo, na literatura não existem muitas abordagens explicativas sobre essas diretrizes, apenas os formulários disponibilizados pelo Mapa. Dessa forma, no presente capítulo a intenção foi facilitar a compreensão de anexos oficiais, com padrões para esclarecer a importância da lei de produção de sementes, e auxiliar produtores, estudantes, futuros agrônomos, fiscais e demais profissionais da área, no passo a passo de legalização da produção de sementes.

Referências

BRASIL. Lei nº 10.711 de 5 de agosto de 2003. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudas e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 6 ago. 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.711.htm. Acesso em: 13 mar. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 9 de 2 de junho de 2005. Aprova as normas para produção, comercialização e utilização de sementes. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 10 jun. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 18 set. 2013. Seção 1.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 10.586, de 18 de dezembro de 2020. Regulamenta a Lei nº 10.711, de 5 de agosto de 2003, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudanças.

Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 21 dez. 2020. Seção 1, p. 2.

GREGG, B. R.; CAMARGO, C. P.; POPINIGIS, F.; LINGERFELT, C. W.; VECHI, C. **Guia de inspeção de campos para produção de sementes**. 3. ed. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011. 39 p.

Literatura Recomendada

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 25 de 16 de dezembro de 2005. Estabelece normas específicas e os padrões de identidade e qualidade para produção e comercialização de sementes de algodão, arroz, aveia, azevém, feijão, girassol, mamona, milho, soja, sorgo, trevo vermelho, trigo, trigo duro, triticale e feijão caupi. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 20 dez. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 2009. 399 p.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO ESTADO DO PARANÁ. **FAEP e MAPA esclarecem produtor sobre sementes para uso próprio**. Curitiba, 2006. Boletim Informativo nº 932, semana de 16 a 22 de outubro de 2006. Disponível em: <http://www.faep.com.br/boletim/bi932/bi932pag10.htm#:~:text=As%20sementes%20certificadas%20possuem%20duas,gen%C3%A9tica%20e%20sua%20pureza%20varietal>. Acesso em: 6 jul. 2020.



Milho e Sorgo

Este livro reúne informações de genética e melhoramento de sorgo, buscando dar suporte ao crescimento da cultura no Brasil. Nele são apresentados os métodos de melhoramento usados no sorgo, esquemas de desenvolvimentos de populações, linhagens e híbridos, além de exemplos de seleção e avaliação de genótipos para estresses bióticos e abióticos.

A obra contribui para o treinamento de novos melhoristas e busca incentivar a criação de novas empresas de sementes, ensinando técnicas de seleção e desenvolvimento de cultivares tropicais de alto rendimento e tolerantes a estresses, como seca, alumínio, doenças e pragas.

Patrocínio:



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL



CGPE 017141