

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.

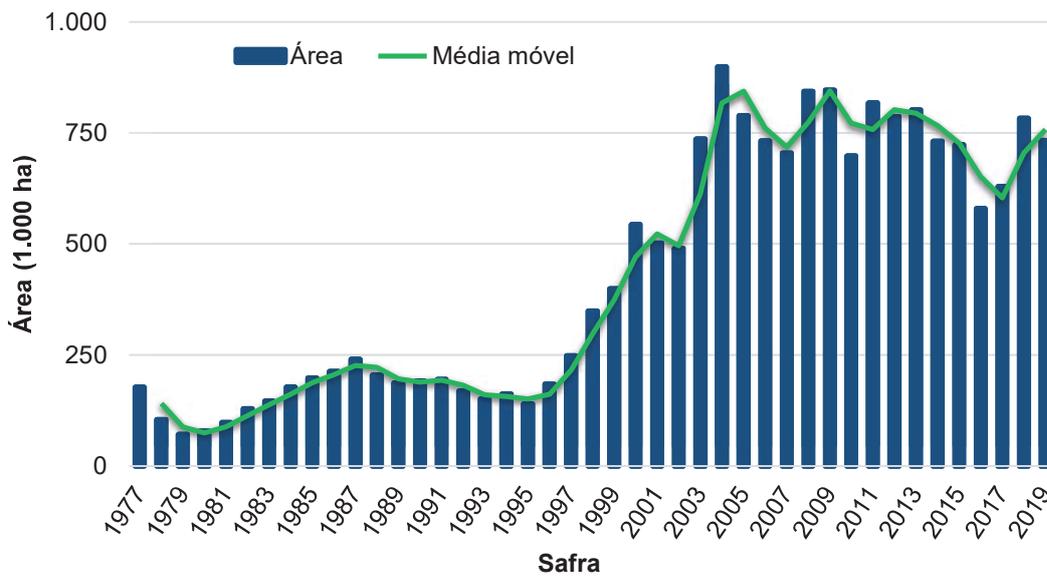


Figura 1. Série histórica de área de sorgo granífero no Brasil. 2020.

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).

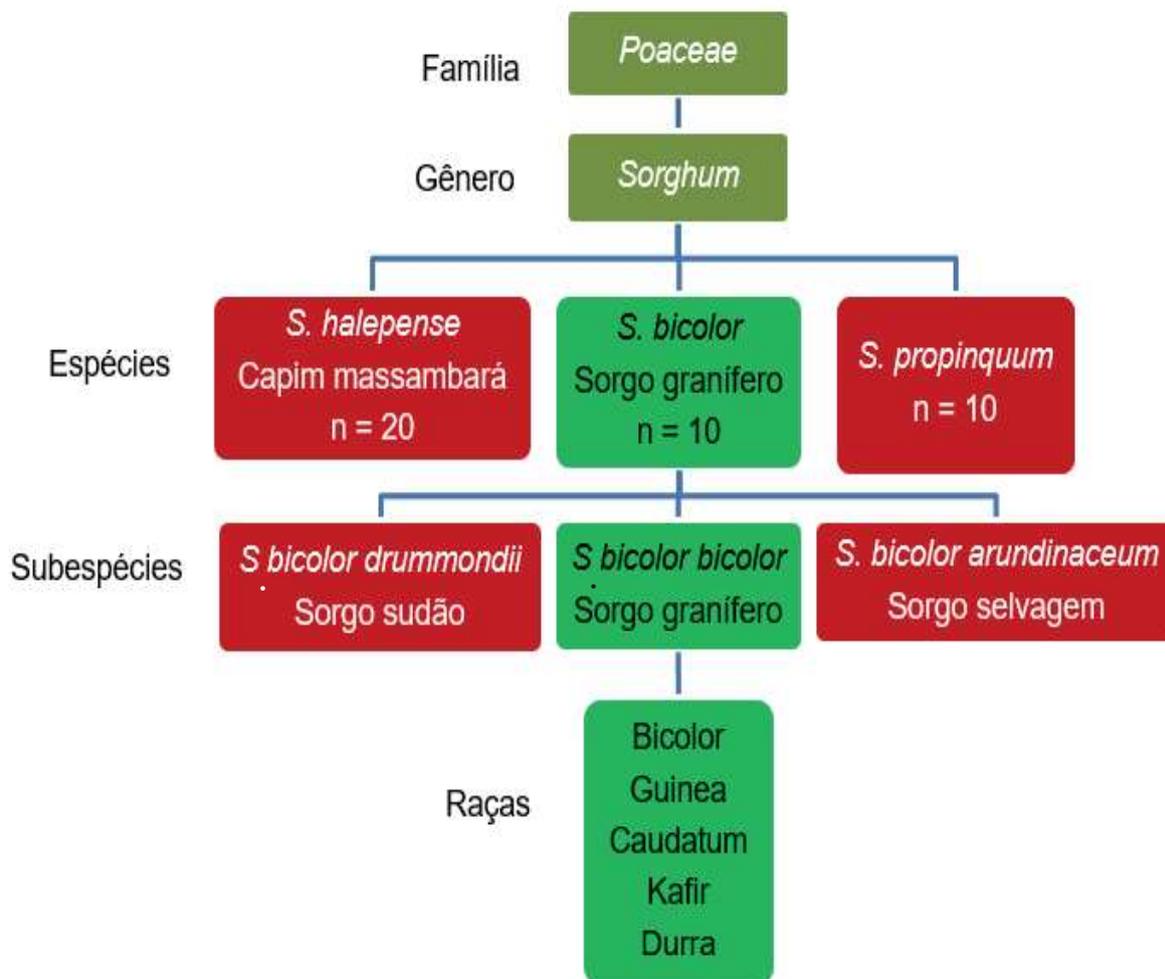


Figura 2. Família, gênero, espécie, subespécie e raças de sorgo (De Wet, 1978).

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.

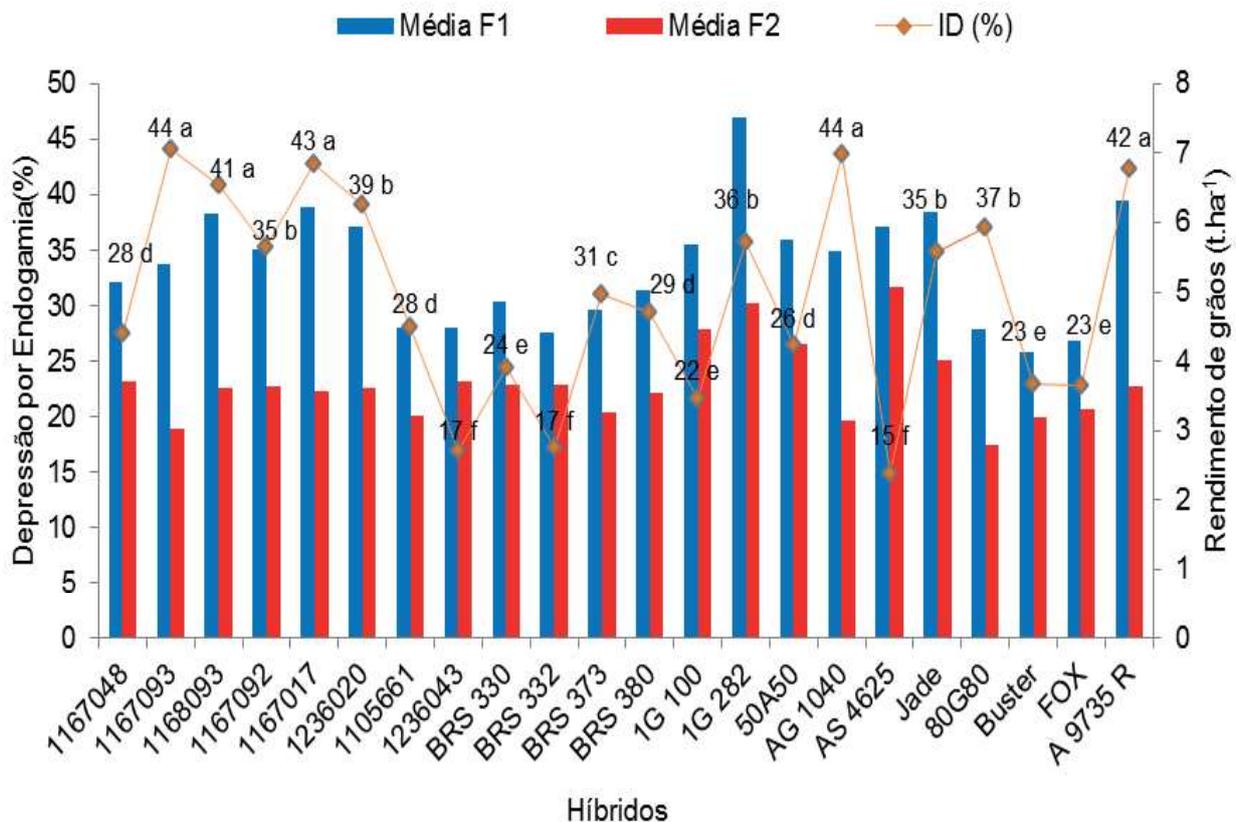


Figura 3. Depressão por endogamia (ID%) em híbridos de sorgo para rendimento de grãos.

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

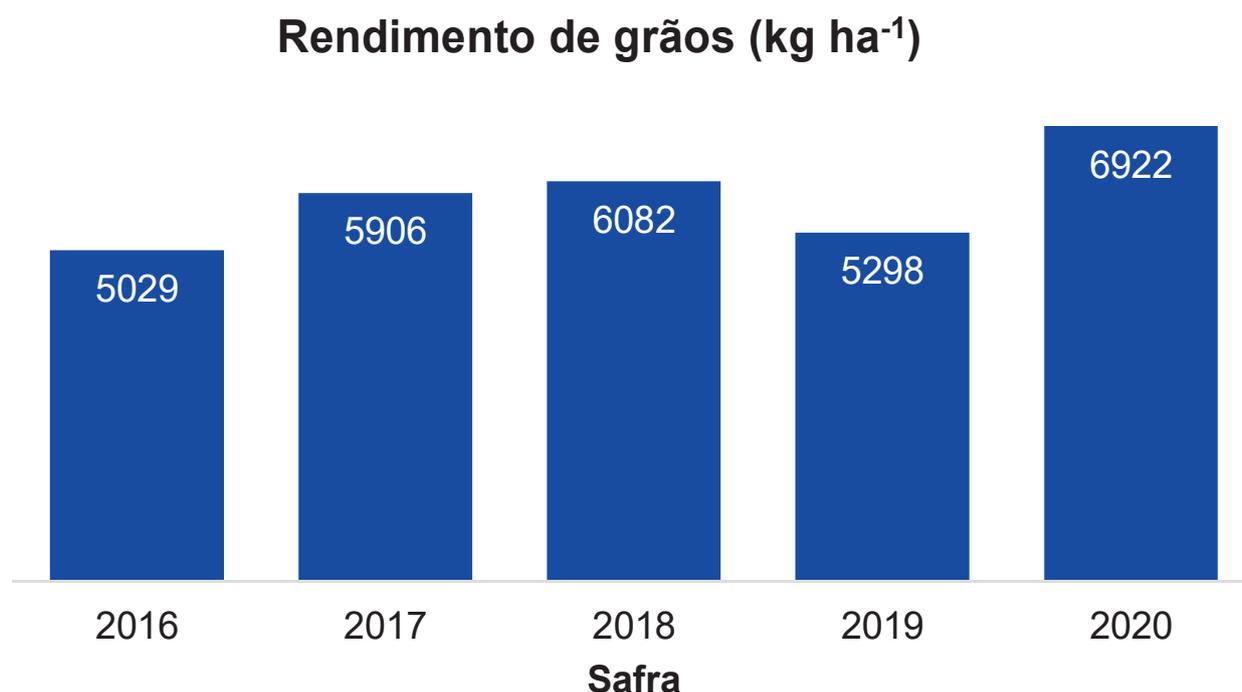


Figura 4. Médias de rendimento de grãos dos últimos cinco anos

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

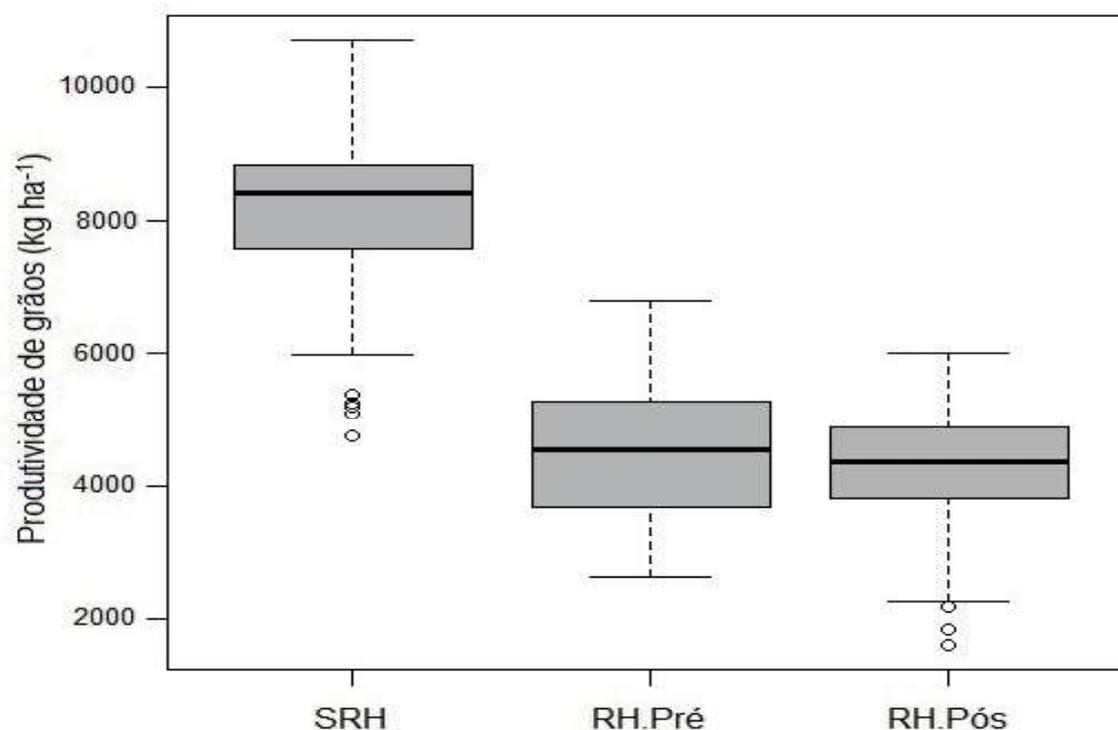


Figura 5. Boxplot para rendimento de grãos (kg ha^{-1} , referente a 25 híbridos de sorgo avaliados em condições sem restrição hídrica (SRH), com restrição hídrica em pré-florescimento (RH.Pré) e restrição hídrica em pós-florescimento (RH.Pós)).

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.

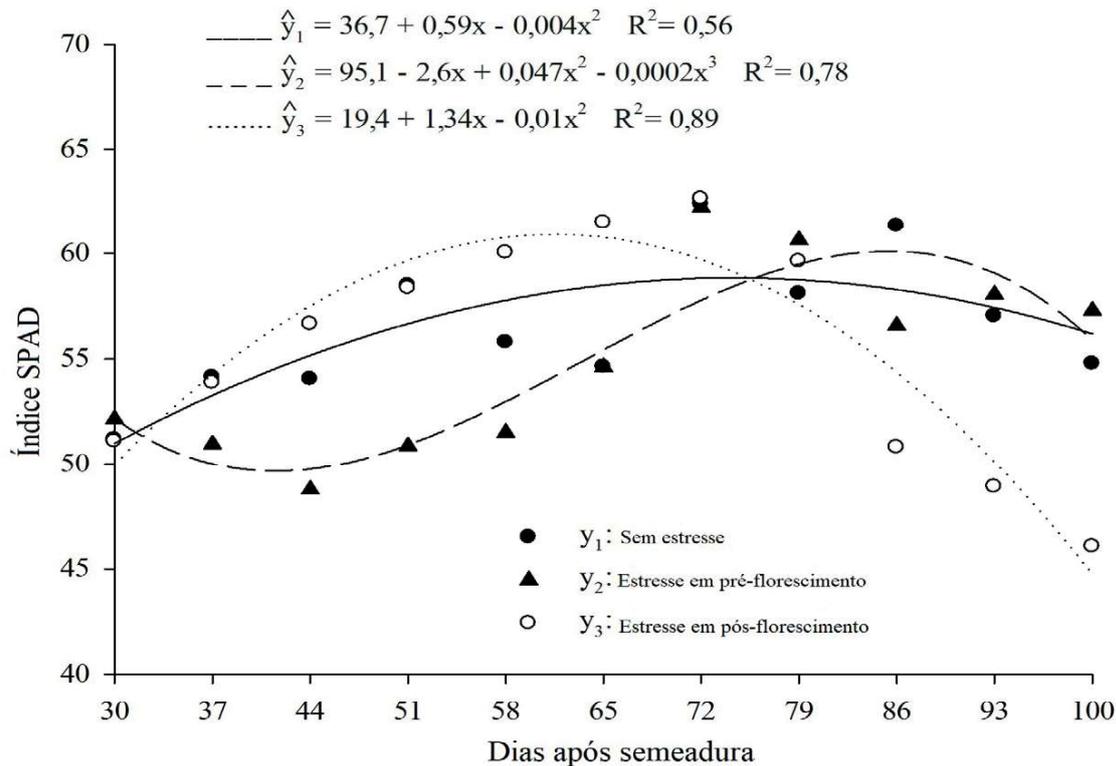


Figura 6. Valores médios do Índice SPAD aos 37, 44, 51, 58, 65, 72, 79, 86, 93 e 100 dias após a semeadura, referente à avaliação de 25 híbridos de sorgo granífero cultivados sem estresse hídrico (Y_1), com estresse hídrico em pré-florescimento (Y_2) e com estresse hídrico em pós-florescimento (Y_3).

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-ramulispóra (*Ramulispóra 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 agronômicas 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 conterà 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 essenciais 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 helmitosporiose, 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 cafirinas dos grãos para melhorar a digetibilidade 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/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. 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.