

CAPÍTULO 2

SECAGEM DE SEMENTES

JOÃO ALMIR OLIVEIRA

STTELA DELLYZETE VEIGA FRANCO DA ROSA

EVERSON REIS CARVALHO

1 INTRODUÇÃO

A produção de sementes de alta qualidade exige cuidados desde a condução da lavoura até a colheita e as fases da pós-colheita, como o processamento, a secagem e o armazenamento. Sua colheita com grau de umidade acima do que é recomendado ao armazenamento seguro, tornou-se uma prática comum entre os produtores, pois, permanecendo na lavoura, após a maturidade fisiológica, elas ficam expostas à ação de flutuações de temperatura e umidade relativa, do orvalho ou das chuvas, sendo que os processos alternados de sorção e desorção de água no seu interior podem causar danos físicos e fisiológicos irreversíveis, além dos riscos de maiores incidências de insetos e microrganismos.

Assim, deve-se evitar o armazenamento das sementes no campo, com a finalidade de reduzir ao máximo as possíveis perdas qualitativas e quantitativas, visto que o atraso na colheita das maduras contribui consideravelmente à sua deterioração. Nesta fase, as sementes com umidade elevada apresentam alta atividade respiratória e conseqüente consumo de reservas que pode levar a um desgaste fisiológico que, na prática, resultará em baixos índices de germinação e de vigor.

Além da redução dos riscos de deterioração, antecipar a colheita das sementes com teores de água mais altos apresenta outras vantagens, tais como: possibilidade de planejamento da colheita; menor perda por deiscência natural; flexibilização das estruturas de processamento e melhor planejamento de rotação de culturas e otimização do uso dos campos de produção.

O momento mais adequado à colheita é o mais próximo possível da maturidade fisiológica, ou quando for tecnicamente viável. Na maturidade fisiológica, as sementes apresentam o máximo acúmulo de matéria seca, sendo esse um referencial importante da independência da semente em relação à planta mãe. No entanto, nesta fase, apresentam graus de umidade que variam entre 30 e 50% em base úmida, assim, fazendo-se necessária a operação de secagem artificial. Embora avaliando que variações climáticas podem ocorrer de um ano para outro, mesmo assim deve haver um bom planejamento desde a época do plantio, para que, no período da colheita, as sementes não fiquem

muito tempo expostas às intempéries e que o processo de secagem ocorra de forma coordenada.

No entanto, apesar de as vantagens que a secagem artificial apresenta, dependendo da forma como é conduzida, pode ser uma fonte de danos às sementes, por isso, merece atenção especial por parte dos produtores. Sua suscetibilidade aos danos por secagem é função de condições do processamento, de sua qualidade no momento da secagem e do teor de água inicial, aliados aos aspectos genéticos. Em função desses fatores, as sementes respondem diferentemente ao processo de secagem, ou seja, à temperatura, ao tempo de exposição à essa temperatura e à velocidade de retirada da água. Sendo assim, é desejável que os esforços via melhoramento genético não sejam apenas para aumento de produtividade, mas também considerem a fase pós-colheita, uma vez que essa etapa completa o sistema de produção, merecendo, dessa forma, uma atenção especial.

Portanto, neste capítulo, serão abordados alguns tópicos relacionados à fisiologia, ao processo e a métodos de secagem.

2 ÁGUA NAS SEMENTES

A semente contém uma proporção variável de água e matéria seca. O grau de umidade expressa a relação da massa de água contida numa amostra de sementes, seja em relação à massa total (ou massa de matéria úmida), seja em relação à massa de matéria seca, representando o grau de umidade em base úmida (b.u.) ou em base seca (b.s.), respectivamente.

Diferentes conceitos têm sido usados para caracterizar propriedades da água em tecidos de plantas. A água presente em uma semente pode estar, em uma forma absorvida, que seria aquela de ligação mais fraca, localizada nos espaços intergranulares e nos poros, em que atuam apenas forças capilares. Também na forma adsorvida (água presa), cujas forças, que agem, são as da atração molecular, podendo ser de natureza física ou química. Em função da natureza das ligações físico-químicas existentes entre os componentes da semente e as moléculas de água, correspondentes aos diferentes níveis de hidratação, a água na semente apresenta-se sob cinco formas diferentes.

A água do *tipo 1* corresponde à água de constituição, encontra-se ligada aos constituintes químicos da semente, por meio de forças de -150 MPa, não havendo interesse em sua remoção, uma vez que pode causar danos letais às sementes, decorrentes do percentual da água retirado, que depende da espécie. Essa água, do tipo 1, também denominada de “água ligada”, é definida como a água que se encontra associada à matriz celular e tão fortemente estruturada que sua termodinâmica e propriedades motoras diferem da água livre.

A água do *tipo 2*, com potencial hídrico de -150 a -11 MPa, corresponde a graus de umidade entre 8 a 22% (b.u.) e do *tipo 3*, de -11 a -4 MPa, corresponde a 22% a 33% (b.u.), dependendo da espécie. Esses dois tipos de água necessitam de maior pressão de vapor para ser removida. As águas do tipo 2 e 3, que se encontram adsorvidas às moléculas, são as que têm maior relação com a secagem comercial, já que a maioria das secagens à produção de sementes estão concentradas, nessas faixas de umidade, e sua retirada pode ser promovida pelo gradiente de umidade relativa e temperatura do ar de secagem.

Na faixa de potencial hídrico de -4 a -2 MPa, o teor de água das sementes varia de 33% a 55% (b.u.) e corresponde à água do *tipo 4*. Além desses quatro tipos, a água nas sementes pode estar em uma forma absorvida, com força de atração fraca (>-2 MPa), correspondente aos graus de umidade acima de 55% (b.u.), denominada de água do *tipo 5*. Esses dois últimos tipos de água são facilmente removidos, não havendo, portanto, necessidade de altas temperaturas, uma vez que a força de atração neste estágio é mínima, e a alta taxa de secagem, ou seja, a retirada rápida de água poderá comprometer a qualidade. Deve-se, neste caso, utilizar temperaturas mais baixas e maior velocidade do ar na secagem.

3 PROCESSO DE SECAGEM

No Brasil, a princípio, foram adotadas tecnologias de secagem geradas no exterior. Quando a pesquisa em sementes se intensificou e a indústria de equipamentos foi incentivada, trabalhos relacionados à secagem, embora, no início, em número reduzido, apresentaram avanços, com envolvimento de vários pesquisadores. Na década de 80, as pesquisas englobaram diversos

tipos de equipamentos, principalmente, aqueles relacionados à temperatura do ar e ao sistema de secagem artificial. Outros parâmetros, como umidade relativa e fluxo de ar de secagem, também passaram a receber maior atenção em experimentos.

Por definição, secagem é o processo de transferência de calor e vapor de água entre a semente e o ar de secagem, em que o ar transfere o calor às sementes, ocorrendo evaporação, e a semente transfere a água evaporada para a corrente de ar, que a levará para fora da massa de sementes. Assim, no conceito tecnológico da secagem, entende-se a massa de sementes como doador de água e a atmosfera como receptora.

Durante a secagem, a retirada da umidade é obtida pela movimentação da água, decorrente da diferença de pressão de vapor d'água entre a sua superfície e o ar que as envolve. A condição para que ocorra a secagem é que a pressão de vapor d'água sobre a superfície da semente seja maior que a pressão de vapor d'água no ar de secagem. O movimento dar-se-á no sentido do gradiente da pressão de vapor d'água. Se essa condição não for satisfeita, poderá, em alguns casos, ocorrer hidratação das sementes, caso a pressão de vapor d'água do ar seja maior que na superfície das sementes.

Assim, a taxa de secagem resulta da velocidade de evaporação da água da semente, relacionada à velocidade de movimentação da água do seu interior para a superfície e depende, fundamentalmente, da umidade, da temperatura e do fluxo de ar empregado. Também é influenciada pela espessura e permeabilidade do tegumento ou pericarpo, pela composição química, pelo genótipo, pelo estágio de maturação e pelo teor de água inicial.

Se ocorrer igualdade dessas pressões, a semente não perderá nem ganhará umidade, ou seja, estará em equilíbrio higroscópico. A fim de que a semente perca água para a atmosfera, é necessário que se reduza o valor de seu ponto de equilíbrio higroscópico, que se consegue reduzindo-se a umidade relativa do ar. Fixada a temperatura, a redução da umidade relativa é feita com a retirada de vapor de água do ar, o que diminui a pressão de vapor, elevando sua capacidade de receber água. Da mesma forma, fixada a umidade relativa, a aplicação de calor eleva a pressão de vapor do ar na semente e reduz seu ponto de equilíbrio higroscópico.

As sementes são materiais higroscópicos e têm a capacidade de absorver, ceder ou reter água e, dessa forma, sua umidade é influenciada, no que diz respeito à umidade relativa e temperatura do ar do ambiente em que estão. A umidade relativa é definida como a relação que existe entre a pressão de vapor d'água do ar existente quanto à pressão de saturação do ar na mesma temperatura expressa em porcentagem. Se a umidade relativa do ar estiver alta, a pressão de vapor também estará e, dependendo dos valores, as sementes podem absorver umidade até se equilibrarem com o meio, em altos teores de água.

Para que a secagem ocorra, é necessário reduzir a umidade relativa do ar, o que se consegue com o aumento da temperatura, dentre outras maneiras. No processo de secagem, componentes térmicos e hídricos do ar interagem, sendo que os mais evidentes são a umidade relativa, a temperatura do ar e o grau de umidade das sementes. Esses componentes subdividem-se e interagem-se, resultando em sete componentes que se constituem em propriedades psicrométricas do ar, como a umidade relativa, a razão de mistura ou umidade absoluta, a temperatura do bulbo seco e do bulbo úmido, o ponto de orvalho, a entalpia e o volume específico.

A adição de energia ao meio de secagem faz com que as moléculas de água se desprendam das moléculas da semente e o vapor de água é retirado das sementes e do ambiente, por meio do ar em movimento, mantendo o déficit de pressão de vapor no sentido semente - ar, permitindo a continuidade do processo de secagem. O ar que passa pela massa de sementes tem duas funções: fonte de calor para permitir a evaporação da água nas sementes e serve como veículo para transportar a água evaporada para fora da massa de sementes.

O fluxo de ar requerido, para secá-las está limitado pela capacidade do ventilador que força o ar pela massa e pelo tipo de ventilador, que, por sua vez, depende do modelo de secador selecionado. Geralmente, em condições tropicais (altas temperaturas e altas umidades relativas do ar), recomenda-se um fluxo de ar mínimo entre 4 e 17 m³ min⁻¹ t⁻¹ de sementes, para secadores estacionários e de 80 a 180 m³ min⁻¹ t⁻¹ de sementes para secadores contínuos e intermitentes, operando a baixas pressões estáticas.

A resistência da semente ao fluxo de ar depende do tipo, envolvendo formato e peso específico, grau de compactação da massa, presença de contaminantes,

umidade e altura da camada. Incrementos nesses fatores representam maior resistência à passagem do ar. Quando se deseja maior fluxo de ar, é recomendável a redução da altura da massa de sementes que aumento da potência do motor.

À medida que o ar é forçado pela massa de sementes, encontra resistência para fluir e essa resistência é conhecida como pressão estática. De maneira geral, quando a altura da massa de sementes é duplicada, a pressão estática e as potências requeridas se quadruplicam e dobra-se o custo de energia elétrica por tonelada de sementes. Por isso, não é recomendável a utilização de pressões estáticas acima de 90 mm de coluna d'água para secá-las.

O fluxo mínimo de ar insuflado por unidade de volume ou por peso de sementes, capaz de promover a sua secagem, sem ocorrência de deterioração, é chamado vazão específica mínima de secagem. A utilização de vazões específicas abaixo do valor mínimo pode comprometer a qualidade das sementes, enquanto a utilização de vazões específicas mais elevadas, apesar de reduzir o tempo de secagem, resultará em aumento do consumo de energia, além de exigir maior investimento inicial e ainda pode causar danos às sementes pela velocidade excessiva da retirada da água, como os danos em membranas celulares.

A taxa de secagem é maior, no início do processo, quando o teor de água é mais elevado e decresce, à medida que o processo avança, porque, como foi descrito, a água é retida na semente por variadas forças de atração molecular, que variam em função dos teores de água. Sendo assim, sementes com teores de água mais elevados são mais sensíveis aos danos térmicos, por isso, quanto mais elevado for o teor de água, menor deve ser a temperatura inicial de secagem empregada. Entretanto danos térmicos também podem ocorrer, durante a última fase da secagem, quando o teor de água das sementes e a velocidade de secagem são menores, pela redução da velocidade de evaporação e pela elevação da temperatura do embrião.

4 SISTEMAS DE SECAGEM

Os sistemas de secagem podem ser classificados, de acordo com a fonte de energia, com a movimentação das sementes no interior do secador, com a

circulação do ar de secagem, dentre outros. No entanto nem todos os sistemas de secagem são adequados à secagem de sementes.

Com relação à fonte de energia e utilização de equipamentos, basicamente, podem ser considerados os sistemas de secagem natural e artificial. A **secagem natural** consiste na utilização da energia solar e do vento, para secar as sementes, sem o uso de qualquer equipamento. Nessa categoria, estão incluídas a secagem das sementes na própria planta ainda no campo e a secagem ao sol em terreiros (Figura 1) os quais, em geral, são de apenas terra (Figura 1A), lâmina asfáltica (Figura 1B), concretados ou e em alguns casos terreiros suspensos. Embora seja alternativa viável de secagem, em algumas situações e espécies, trata-se de um método com algumas desvantagens, como grande dependência das condições climáticas, inviabilidades técnicas e logísticas, para maiores volumes de sementes, possibilidades de desuniformidade e de ocorrência de danos com perdas qualitativas e quantitativas, suscetibilidade às enfermidades e aos ataques de insetos, maior demanda de mão de obra, maior tempo para secagem, entre outras. Porém, para algumas espécies olerícolas, forrageiras e para a espécie *Coffea arabica*, esse método tem sido o mais indicado.



Figura 1: Secagem natural de sementes de forrageiras, em terreiros (chão batido), improvisados no próprio campo de produção (A) e com lâmina asfáltica (B).

A **secagem artificial** consiste em alterar as propriedades físicas do ar, aumentando sua velocidade e temperatura e, em alguns casos, reduzindo a

umidade relativa para secar as sementes por meio de equipamentos. Incluem, nessa categoria, o sistema de secagem com ar natural, secagem com aquecimento suplementar e secagem com ar aquecido.

No **sistema de secagem com ar natural**, o ar com temperatura e umidade relativa ambiente é forçado a atravessar a massa de sementes, por meio de ventiladores. Trata-se de sistema de menor custo, pois é requerida energia apenas para o funcionamento do ventilador, mas apresenta desvantagens, como a dependência das condições ambientais (recomendado para situações com umidade relativa inferior a 60%), tempo de secagem prolongado e requer um maior número de silos secadores.

No **sistema de secagem com aquecimento suplementar**, o ar é aquecido até 10°C acima da temperatura ambiente e esse sistema também requer menor gasto de energia, melhor controle em caso de clima desfavorável e constitui boa alternativa para pequenos agricultores.

No **sistema de secagem com ar aquecido**, o ar é aquecido continuamente enquanto durar o processo de secagem. É o sistema mais utilizado por empresas de sementes, visto que permite maior controle da secagem independentemente das condições ambientais, secagem de grandes volumes de sementes em tempos menores e é possível monitorar todo o processo de secagem, a partir da umidade inicial.

Dependendo da forma de movimentação das sementes no interior do secador, podem ser considerados três principais tipos de secadores artificiais com ar quente: estacionários, contínuos e intermitentes.

No **secador estacionário**, a secagem consiste em forçar um fluxo de ar aquecido pela massa de sementes, que não é movimentada durante o processo. No início da secagem, é estabelecida uma zona de intercâmbio da umidade das sementes com o ar, conhecida como frente de secagem, a qual vai avançando pela massa de sementes com o decorrer do processo. É o sistema mais adequado à secagem de sementes, visto que é eficiente e causa-lhe menores danos mecânicos, se operado adequadamente. Existem vários tipos de secadores estacionários, como: silo-secador de fundo falso com distribuição de ar longitudinal, silo-secador com distribuição de ar radial (Figuras 2 A e 2 B), secador de milho em espigas com fluxo de ar longitudinal (Figuras 2 C e 2 D), secador de sacos e secador em túnel, entre outros.



(Fotos dos Autores).

Figura 2: Modelo de secadores estacionários com fluxo de ar radial (A e B) e secadores de milho em espigas com fluxo de ar longitudinal (C e D)

O **secador contínuo** foi o primeiro a ser desenvolvido no qual é estabelecido um fluxo contínuo de sementes entre a moega receptora, a câmara de secagem e o depósito. As sementes entram úmidas, na parte superior do secador, fluem lentamente em camadas delgadas sempre expostas ao fluxo de ar quente (secagem contínua), até chegarem ao fundo do secador (Figura 3). É necessário que passe pela câmara de secagem com velocidade tal que possa perder toda a água que se deseja retirar. Se não atingirem o teor de água

necessário, durante sua passagem na câmara de secagem, são recirculadas até que alcancem a umidade final desejada.

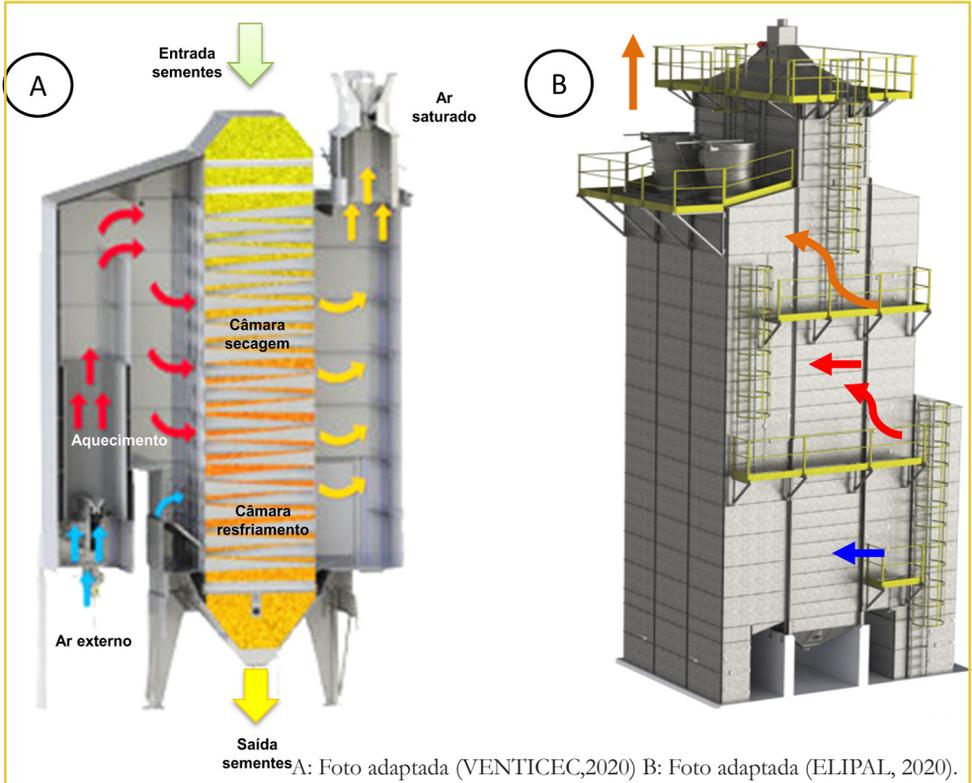


Figura 3: Esquema do fluxo de ar e modelos de secadores contínuos

Os secadores contínuos, de modo geral, não são recomendados à secagem de sementes, porém admite-se essa possibilidade desde que sejam feitas determinadas modificações, tais como redução do impacto das sementes durante o fluxo, aumento do número de passagens e da velocidade de fluxo da massa de sementes pela câmara de secagem, para evitar uma secagem muito rápida, o que pode lhes provocar fissuras.

No **secador intermitente**, as sementes entram na parte superior, fluem lentamente até serem descarregadas, na parte inferior do secador e entram em contato com o ar quente somente na câmara de secagem (secagem intermitente). Elas passam, mais de uma vez, tanto pela câmara de secagem, como pela câmara de equalização. A cada passagem pela câmara de secagem, podem perder de dois a três pontos porcentuais de umidade, dependendo do teor de água inicial. O tempo de permanência na câmara de equalização é bem mais longo que na câmara de secagem, permitindo que a água se desloque do interior das sementes para a camada superficial de uma forma mais lenta, diminuindo os riscos de danos (Figura 4).

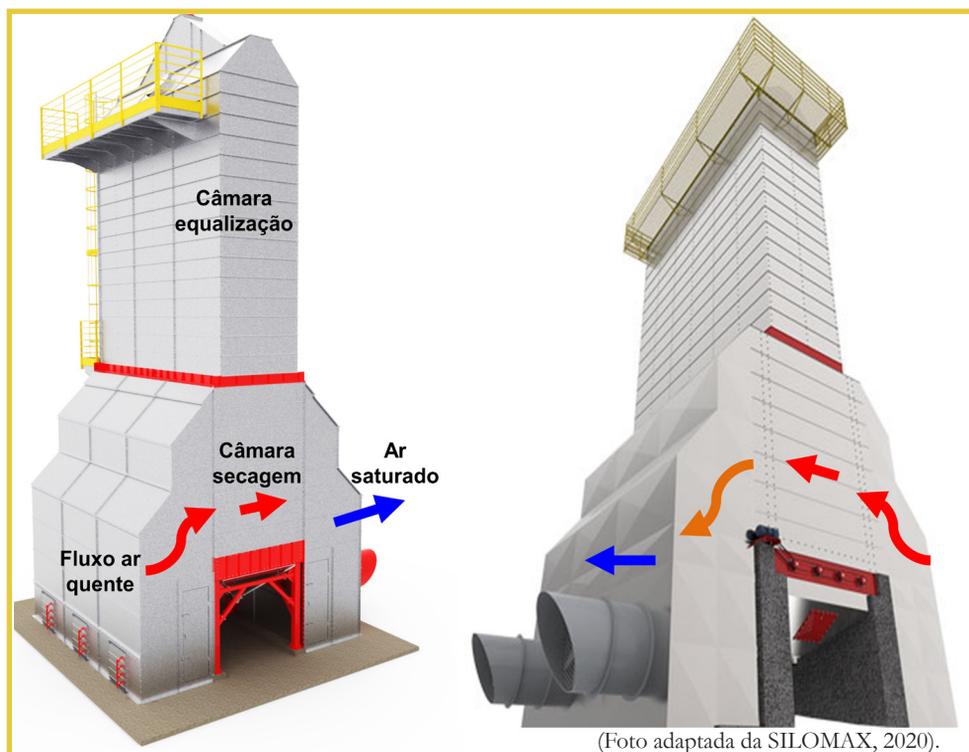


Figura 4: Esquema do fluxo de ar e modelo de secador intermitente.

De forma geral, em trabalhos de pesquisa, tem sido demonstrado que a secagem intermitente permite o uso de temperaturas mais elevadas, acelera o processo de secagem. A secagem se torna mais uniforme na massa de sementes, aumenta a capacidade operacional dos equipamentos e causa menores danos à sua qualidade. No entanto o secador deve trabalhar com carga total, pois, quando isso não acontece, os danos mecânicos são bastante expressivos, conforme foi verificado por Radke, Batata e Villela (2017), trabalhando com secagem de sementes de soja em secador intermitente.

Qualquer que seja o tipo de secagem, a temperatura das sementes, durante o processo, não deve ultrapassar valores específicos, que variam em decorrência de seu teor de água, no momento em que estão sendo expostas à corrente de ar aquecido, bem como em relação à espécie.

Outro aspecto de grande relevância, a ser considerado em sistemas de secagem de sementes, é a eficiência térmica de um secador, quando se realiza a sua secagem imediata, próxima à maturidade fisiológica, com uma quantidade muito grande de água a ser evaporada.

Secadores apresentam diversas faixas de consumo de energia decorrentes de seu sistema construtivo. Alguns secadores podem consumir uma carga de energia de até 1500 Kcal/kg de água evaporada, enquanto secadores com recirculação do ar de resfriamento e de parte do ar de secagem podem reduzir este número a valores inferiores a 950 kcal/kg de água evaporada. Outros modelos de secadores, como o de fluxo concorrente, que trabalham com temperaturas mais elevadas operam na faixa de 1200 kcal/kg de água evaporada, e desempenho similar é alcançado por secadores intermitentes com câmara de repouso. Esses números podem mudar, em função do tipo, das faixas de redução de umidade e de características próprias dos secadores de sementes, incluindo seu volume interno, taxas de ventilação e temperaturas de secagem.

Dentre todos esses fatores, o que tem maior efeito no consumo específico de um secador é a temperatura de secagem, pois, quanto mais elevada mais termicamente eficiente é o secador. Esse benefício, no entanto, é contrabalançado pelo dano que altas temperaturas podem causar à qualidade das sementes, o que acaba por limitar este parâmetro de secagem. Diferentes fabricantes usam

diferentes critérios de desenho, tentando encontrar a melhor combinação entre vazões específicas, volumes em processo e temperaturas de secagem que resultem em equipamentos com a melhor relação custo/benefício e que causem a menor agressão às sementes.

Há de se considerar ainda a capacidade do equipamento em proporcionar uma secagem homogênea, para cada tipo de semente que se processa, independentemente de sua umidade inicial. Outra questão que deve ser avaliada é a ocorrência dos danos mecânicos, sendo os principais vilões, neste aspecto, sobretudo, quanto aos dispositivos de carga e descarga.

Secadores devem ainda atender as questões relacionadas à facilidade de limpeza e manutenção e devem ser dotados de sistemas de comando que permitam uma operação mais adequada, cuidadosa e eficiente e que evitem a contaminação de lotes de sementes.

4.1 Sistema de secagem com ar desumidificado

Os avanços em secagem de sementes, nas últimas décadas, envolveram apenas modificações nos secadores, e pouco foi feito para otimizar a capacidade de secagem do ar. Foram utilizados os mesmos conceitos de aquecimento do ar e redução da umidade relativa, sem se preocupar, contudo com a razão de mistura. Todavia, mais recentemente com a evolução dos dispositivos, para condicionamento e circulação do ar, já conhecidos pela indústria de sementes, em processos de resfriamento, levou à adaptação desses sistemas para desumidificação e aquecimento do ar, originando os secadores com ar desumidificado (Figura 5 A) por meio da utilização das Unidades de Tratamentos de Ar (UTA's) (Figura 5 B). O equipamento possui a capacidade de desumidificar o ar por resfriamento, condensando o vapor de água presente no ar, com posterior aquecimento, para a obtenção de ar com menor umidade relativa. Dessa forma, ocorre aumento da capacidade de retenção de água pelo ar e redução da razão de mistura, resultando numa massa de ar mais seco. Com isto, é possível utilizar temperaturas mais baixas, durante o processo de secagem, sem perdas grandes de rendimento; reduzir os danos provocados pela elevação excessiva de temperatura, prática comum e

erroneamente utilizada para aumentar taxa de secagem e rendimento operacional de secadores de sementes. Os principais danos de secagem estão relacionados às membranas celulares, em função da velocidade de secagem pelo aumento da temperatura. Avelar et al. (2011), utilizando o sistema de desumidificação do ar pelo método do resfriamento, para secagem de sementes de soja, verificaram que, para reduzir a umidade relativa do ar para 40%, foi necessário aumentar a temperatura para 33°C e, neste processo, não houve redução de sua qualidade fisiológica.

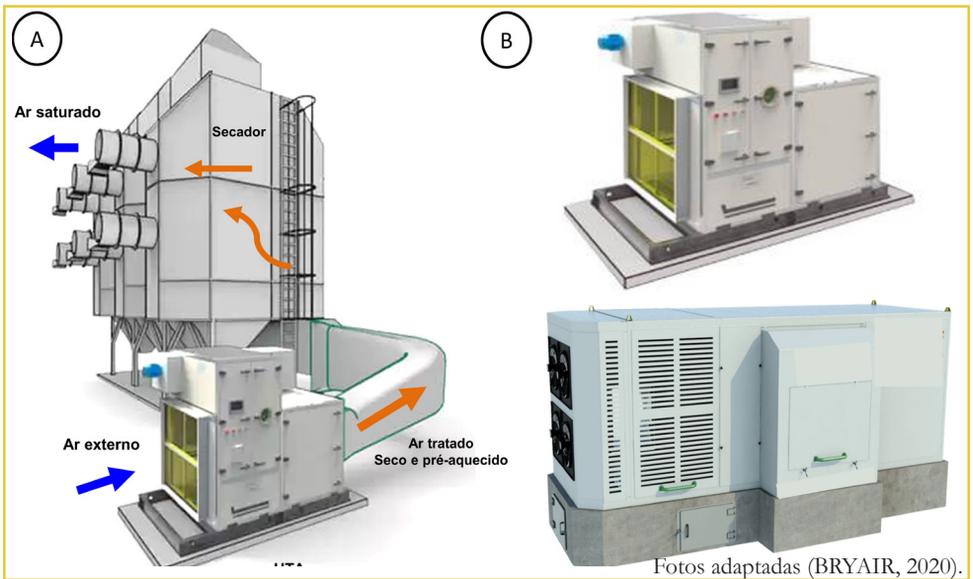


Figura 5: Esquema do fluxo de ar em secador com ar desumidificado e Unidades de Tratamentos de Ar (UTA's).

5 ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DANOS CAUSADOS DURANTE A SECAGEM DE SEMENTES

A secagem é considerada necessária à conclusão do ciclo de vida de espécies ortodoxas, como uma adaptação estratégica para tornar a semente apta à

sobrevivência, durante o armazenamento, garantindo a disseminação da espécie no tempo e a tolerância às condições ambientais.

Assim, para a maioria das sementes ortodoxas (espécies que toleram a desidratação), a secagem após a maturidade é a fase final de seu desenvolvimento. Nas últimas fases do seu desenvolvimento, adquirem tolerância à dessecação, a qual conduz a um estado de quiescência metabólica, considerada necessária a uma adaptação estratégica às condições ambientais, garantindo a disseminação das espécies.

Entretanto as sementes parecem não tolerar a secagem durante todo o período do seu desenvolvimento. Na verdade, elas podem resistir à transição de um estado intolerante a um estado tolerante à dessecação, num momento particular do curso de seu desenvolvimento. Tem sido enfatizado que a aquisição de tolerância à dessecação é adquirida, coincidentemente, com a capacidade para germinar, após subseqüente reidratação e que a secagem é provável que aja para completar o processo de desenvolvimento e iniciar aqueles processos metabólicos para preparar as sementes para a germinação e crescimento.

Ao final do ciclo de desenvolvimento de sementes, sobretudo, as ortodoxas, diversas mudanças metabólicas ocorrem, as quais envolvem a ocorrência de diversos eventos inter-relacionados, bem como o aparecimento de substâncias que têm significância funcional com respeito à proteção contra os danos da desidratação. Existem evidências substanciais de que a dessecação é um sinal, para que as sementes ortodoxas passem de um programa de desenvolvimento para um programa orientado, em direção à germinação e ao crescimento do embrião.

Em contraste, algumas espécies não toleram a dessecação, durante o desenvolvimento e maturação, sendo inaptas ao armazenamento por maiores períodos. São as com características de recalcitrância, as quais são disseminadas com altos teores de água e sobrevivem por curtos períodos de tempo. Essas características são variáveis com a espécie e estão associadas a um grau mínimo de umidade final e às condições específicas de temperatura e umidade relativa do ar no armazenamento.

A água tem papel fundamental nas plantas e por suas propriedades de solvente biológico ideal e interações hidrofílicas e hidrofóbicas, controla os

processos vitais, nas células e nas organelas, estabilizam macromoléculas e membranas, o que permite a compartimentalização de constituintes celulares, inibe reações deletérias, entre outros. Dessa forma, a retirada da água poderá afetar a natureza de reações físicas e bioquímicas, e um organismo que pode tolerar a desidratação deve estar apto a prevenir e/ou reparar as reações deletérias induzidas pela remoção da água.

Em sementes ortodoxas, em estádios tolerantes à dessecação, a água do tipo 2 (22 até 8% de teor de água, dependendo da espécie) ou até mesmo parte da água do tipo 1 podem ser retiradas, sem causar danos às sementes, sendo que elas podem sobreviver por períodos prolongados nesta condição. Já nas sensíveis à dessecação, danos letais podem ocorrer quando a água dos tipos 4 ou 3 forem removidas.

A secagem artificial pode ser uma importante causa de danos a sementes com significativas reduções na qualidade fisiológica, sendo que a sua susceptibilidade a esses danos é função das condições impostas, como temperatura, tempo de exposição às altas temperaturas, volume e pressão estática do ar de secagem, velocidade de secagem, método de secagem, etc., além do grau de umidade e qualidade fisiológica inicial das sementes e os aspectos genéticos.

A remoção de água das sementes causa alterações químicas, físicas e biológicas, tornando críticas as condições de realização da secagem, as quais devem ser escolhidas, tendo em vista, primordialmente, os efeitos que podem causar sobre a sua qualidade. Todas essas alterações ocorrem, ao mesmo tempo e são causadas por gradientes de temperatura e umidade que ocasionam estresses hídricos e térmicos, expansão, contração e alterações na densidade e porosidade. Estas mudanças variam significativamente de acordo com a espécie, cultivares e as condições de secagem.

Como consequência, o processo de secagem pode provocar fissuras que as tornam mais susceptíveis à quebra durante o beneficiamento. A fissura não é uma ruptura superficial, mas resulta de uma expansão da superfície, pela sorção da água do ar ambiente, do interior das sementes ou de ambos. Ao sofrerem expansão, as células da superfície da semente exercem uma compressão, enquanto as células da região interna sofrem contração e desenvolvem uma tração da porção interna,

a partir de um gradiente de pressão decrescente na semente, após um período de secagem rápida, ocasionando as fissuras.

As principais consequências de trincas e fissuras em sementes provocadas pela secagem são: as alterações cromossômicas e mitocondriais, desintegração das membranas celulares, ruptura das ligações peptídicas de proteínas, desnaturação de proteínas e redução da capacidade de trocas hídricas e gasosas em função da perda da permeabilidade seletiva das membranas. Além disso, tornam-se mais vulneráveis ao ataque de pragas e microrganismos, durante o armazenamento, reduzindo assim sua longevidade.

Sementes com teor de água mais elevado são mais sensíveis aos danos térmicos e, quanto maior o teor de água, menor deve ser a temperatura empregada, no início da secagem e mais rápido deve-se iniciar o processo de secagem. Carvalho et al. (2019), avaliando o efeito do tempo de espera, para iniciar a secagem de diferentes temperaturas da massa de sementes de milho, colhidas em espigas com alto teor de água, tentando simular as possíveis condições que as recém-colhidas estão sujeitas até iniciar a secagem, verificaram que, em temperatura abaixo de 40° C, não houve redução de sua qualidade fisiológica, por um período de até 36 horas para iniciar o processo de secagem das espigas. Por outro lado, na temperatura de 50° C, houve redução da germinação, a partir das 36 horas e redução do vigor, a partir de 24 horas de espera, para iniciar a secagem.

Além disso, danos térmicos também podem ocorrer, durante a última fase da secagem, quando o teor de água das sementes e a velocidade de secagem são menores, pela redução da velocidade de evaporação e pela elevação da temperatura nos tecidos dos embriões.

À medida que as sementes perdem água, ocorre a síntese de RNA que codifica enzimas diretamente envolvidas nos processos de hidrólise de reservas, a partir da absorção de água, para que ocorra a germinação e o crescimento do embrião. A mobilização de reservas de amido, em sementes de cereais, durante a germinação, requer a produção e secreção de α -amilase pela camada de aleurona, a qual ocorre em resposta ao hormônio giberelina (GA3). A secagem reduz a síntese de ABA e aumenta a sensibilidade da camada de aleurona ao GA3, ocorrendo

a síntese de α -amilase que atuará, na hidrólise do amido, disponibilizando os nutrientes necessários ao crescimento do embrião.

O ácido abscísico (ABA), um hormônio que atua na prevenção da germinação, durante o desenvolvimento das sementes, tem a sua síntese reduzida ou ocorre uma diminuição da sensibilidade das sementes a ele, quando inicia a secagem após maturação. Assim, parece que o ABA está envolvido em tolerância à dessecação, uma vez que organismos deficientes na sua síntese ou insensíveis a ele são também sensíveis à desidratação.

Evidências do papel do ácido abscísico na tolerância à dessecação de sementes de milho foram documentadas por Boichichio et al. (1994). Os resultados de seu trabalho mostraram que, durante o desenvolvimento de embriões de milho, o ABA endógeno aumenta, concomitantemente com a aquisição de tolerância à dessecação. Já em embriões sensíveis, a tolerância é adquirida, se esses suportarem uma secagem lenta, durante a qual o ABA aumenta. Embriões intolerantes à dessecação, com deficiência de ABA, podem, ainda, tornarem-se tolerantes, por meio da ação exógena de ABA, segundo os resultados desta pesquisa.

Há evidências de que a velocidade de retirada da água pode intervir no tipo de dano causado, no grau de tolerância à dessecação e na viabilidade, principalmente para sementes com características de recalcitrância (ROSA et al., 2005; JOSÉ et al., 2011; COELHO et al., 2015). Segundo Coelho et al. (2015), sementes sensíveis à dessecação podem sobreviver a menores teores de água, quando submetidas a uma secagem mais rápida, o que evita que os danos se acumulem durante o processo. Porém outros autores afirmam que a secagem lenta pode aumentar a tolerância à dessecação das sementes pelo maior tempo para indução de mecanismos de proteção (SANTOS; VON PINHO; ROSA, 2013; ABREU et al., 2014).

A secagem lenta também pode proporcionar mudanças no conteúdo dos carboidratos, ocorrendo um acúmulo do dissacarídeo sacarose e dos oligossacarídeos rafinose e estaquiose, além de um decréscimo dos monossacarídeos glicose, manose, frutose e galactose. Em sementes ortodoxas, o acúmulo dos carboidratos sacarose e oligossacarídeos, em detrimento do acúmulo dos monossacarídeos, em resposta à secagem, parece estar associado à aquisição de tolerância à dessecação, dado que esses carboidratos atuam na proteção celular, estabilizando fosfolípidios,

proteínas das membranas e protegendo estruturas citoplasmáticas por meio da formação de vidros aquosos.

Rosa et al. (2004), trabalhando com sementes de milho colhidas com umidade acima de 40%, verificaram que elas são intolerantes a altas temperaturas de secagem (50°C). Entretanto, quando foram submetidas a uma secagem prévia (pré-condicionamento), em baixa temperatura (35°C) até atingir umidade próxima de 25%, tornaram-se tolerantes à alta temperatura de secagem (50 °C). Esses mesmos autores verificaram, ainda, que a germinação das sementes foi bem correlacionada com a condutividade elétrica e açúcares lixiviados, após diferentes tempos de pré-condicionamento, indicando o envolvimento da função de membranas nos danos causados por altas temperaturas de secagem. A concentração total de açúcares solúveis decresceu, durante o pré-condicionamento, sem mudanças significativas no conteúdo de monossacarídeos individuais. A composição percentual de sacarose e oligossacarídeos maiores, como a rafinose, aumentou significativamente durante o pré-condicionamento. A alta correlação entre rafinose/sacarose e germinação, condutividade e açúcares lixiviados, indicam o efeito adicional da rafinose sobre a proteção de membranas. Esses resultados indicaram, segundo os autores, que açúcares solúveis representam um importante papel na estabilização de membranas, e a presença de rafinose, em certos níveis, também, pode ser um fator-chave à proteção contra danos causados por altas temperaturas.

Como visto, durante a secagem, após a maturidade fisiológica, ocorrem mudanças físicas, fisiológicas e bioquímicas complexas, sob um controle genético, as quais ainda não estão totalmente elucidadas. Essas mudanças que conferem tolerância à dessecação em sementes ocorrem, gradativamente, de forma programada e de acordo com a espécie. Enquanto a água vai sendo removida, mecanismos de proteção vão sendo impostos.

Mudanças que ocorrem, nas fases finais de maturação, quando elas perdem água, envolvem o aparecimento dos açúcares que estabilizam proteínas e fosfolipídeos de membranas e estabilizam citoplasma e organelas, por meio da formação de um estado vítreo, além do aparecimento das proteínas LEA, que também estabilizam membranas e a presença de sistemas de proteção contra os radicais livres (LEPRINCE; HENDRY; MCKERSIE, 1993). Assim, a pré-

secagem, utilizando temperaturas mais baixas, como observado nos trabalhos de Rosa et al. (2004), pode propiciar maior tolerância a temperaturas mais altas de secagem e sementes de melhor qualidade, pois podem dotar de mecanismos de proteção contra os efeitos estressantes da secagem.

Essa indução de tolerância a altas temperaturas de secagem é variável com as espécies e também entre diferentes cultivares de uma mesma espécie, o que foi confirmado, em trabalho realizado por José, Von Pinho e Dias (2006), em dez cultivares de milho híbrido, com diferentes níveis de tolerância à alta temperatura de secagem, com efeito recíproco para essa tolerância. Neste trabalho, foi pesquisada a composição de açúcares solúveis, assim como a relação entre a composição desses açúcares e a tolerância à dessecação de sementes de milho colhidas com teor de água de, aproximadamente 35% e secadas a 45 °C e submetidas à avaliação da qualidade fisiológica, por meio do teste de germinação e de testes de vigor. Foi observada variação na composição dos açúcares entre as sementes dos híbridos e as de seus recíprocos, sendo que maior concentração de sacarose foi verificada nas sementes dos híbridos tolerantes à alta temperatura de secagem. Não foi possível estabelecer uma relação entre a sacarose e rafinose que pudesse servir de parâmetro, para a tolerância à alta temperatura de secagem, em sementes de milho. Maior tolerância foi associada à maior relação da sacarose, rafinose e estaquiose/glicose e frutose. De acordo com esses resultados, ficou evidente que, dentre os mecanismos de tolerância à dessecação de sementes de milho, a presença de determinados açúcares solúveis está envolvida na aquisição e manutenção da tolerância à dessecação.

A relação entre açúcares solúveis e a perda de tolerância à dessecação de eixos embrionários de soja, ervilha e milho foi também estudada por diversos pesquisadores, os quais demonstraram que sacarose e oligossacarídeos maiores estavam consistentemente presentes, durante todo o estágio tolerante, e a tolerância à dessecação desapareceu, à medida que o conteúdo de oligossacarídeos diminuía. De acordo com esses resultados, oligossacarídeos podem prevenir a cristalização de sacarose; na forma não cristalizada, a sacarose pode interagir com superfícies da membrana, possivelmente, substituindo a água na manutenção de sua estrutura. Também, a perda de tolerância à dessecação coincide com um aumento no

conteúdo de açúcares reduzidos, e seu acúmulo num processo de secagem de sementes poderia induzir a ocorrência da reação de Maillard, uma série complexa de reações não enzimáticas que podem induzir centenas de produtos finais, dependendo das condições da reação, a qual pode causar inativação de proteínas e danos ao DNA, portanto ameaçando a viabilidade das sementes.

A tolerância à dessecação e a altas temperaturas de secagem é também função do estágio de desenvolvimento. Sementes de híbridos de milho colhidas, em diferentes estádios de “linha de leite” e submetidas à secagem, em temperatura inicial de 35°C, até atingirem 20% de teor de água, seguida de temperatura de 42 °C até 12% de teor de água, foram avaliadas nos trabalhos de Faria et al. (2007). Foram constatadas diferenças entre os estádios de desenvolvimento, sendo que as de milho colhidas, a partir do estágio três de linha de leite, quando se encontram com 50% do endosperma sólido, têm maior tolerância à dessecação e à alta temperatura de secagem.

Leprince et al. (1993), em uma revisão sobre os mecanismos de tolerância à dessecação, em sementes em desenvolvimento, definiram três principais mecanismos: a) o acúmulo de açúcares não redutores, os quais estabilizam membranas e proteínas em condições secas e promovem a formação de uma fase vítrea no citoplasma; b) a habilidade para prevenir ou reparar um ataque de radicais livres durante a dessecação; e, c) proteínas LEA que são induzidas por ácido abscísico (ABA). Os autores enfatizam que “nenhum destes mecanismos, completa ou exclusivamente, é responsável por tolerância à dessecação, a qual não é atribuída a um simples mecanismo de proteção, mas sim como uma característica multifatorial onde cada componente é igualmente crítico, atuando em sinergismo e controlado a nível genético”.

Em sementes de soja, a qualidade fisiológica, bioquímica e ultraestrutural foram avaliadas durante o desenvolvimento e secagem (SILVA et al., 2007). Considerando que a colheita antecipada de sementes, após a maturidade fisiológica, permite a obtenção da melhor qualidade fisiológica e sanitária, a rotação de culturas e otimização das estruturas de processamento, sementes de soja foram colhidas em diferentes estádios de maturação e submetidas à secagem artificial a 35 °C até 20% de teor de água e a 42 °C até 13%. Uma última colheita

foi realizada com sementes secadas no campo, sendo utilizadas como testemunha. Com os resultados, concluiu-se que a germinação, vigor e a tolerância à dessecação de sementes de soja aumentam nas sementes que permaneceram no campo para a perda natural de água. Sementes colhidas no estádio R7 apresentam maior qualidade fisiológica, padrão diferenciado de proteínas LEA e maior tolerância à dessecação que nos estádios R6 e R6/R7. Segundo esses autores, a secagem das sementes colhidas próximas à maturidade induz a síntese de LEA proteínas, e sementes colhidas no estádio R7 apresentam qualidade fisiológica e padrão de proteína LEA similares aos de sementes secadas no campo até 14% de teor de água. Foi concluído que a síntese de enzimas antioxidantes e de proteínas resistentes ao calor é induzida pela diminuição, no conteúdo de água das sementes, seja natural ou artificialmente, a partir de 60% de umidade e está diretamente relacionada com a qualidade fisiológica das sementes de soja. Além disso, as sementes de soja tornam-se tolerantes à dessecação, quando possuem em torno de 30% de teor de água, quando apresentam maiores porcentagens de germinação e de vigor, menor incidência de danos em membranas, comprovada por menores valores de condutividade, além de maior atividade de enzimas envolvidas na respiração e proteção contra radicais livres.

Segundo Leopold e Vertucci (1986), à medida que as células perdem água, a solução intracelular torna-se concentrada e os solutos podem cristalizar, ou a solução pode tornar-se supersaturada com um conseqüente aumento de viscosidade. Quando a viscosidade alcança o ponto, no qual a difusão da água é impedida (taxa de difusão igual a 10^{-6} nm/s, uma simples solução aquosa), a solução assume a propriedade de um sólido plástico, chamado “vidro”. Segundo os autores, um vidro é essencialmente um líquido “under-cooled” e, portanto, sua existência é dependente da temperatura.

A água tem propriedades que a fazem um solvente biológico ideal, representando muitos papéis nos processos vitais. Sendo assim, danos às sementes, em conseqüência da dessecação, podem ocorrer quando a água é removida das células. Pelo fato de a água afetar as condições da célula de muitas maneiras, os tecidos que sobrevivem à sua remoção têm uma combinação de estratégias para limitar os danos resultantes da desidratação. Organismos que sobrevivem

à remoção de água são porque seus constituintes celulares estão protegidos ou podem ser reparados (WOLKERS et al., 2001).

Sementes que toleram a dessecação dispõem de alguns mecanismos de proteção capazes de manter os sistemas de membranas das células, as estruturas das macromoléculas e as substâncias de reserva, em condições de readquirirem suas funções fisiológicas, quando as sementes são ré-embebidas. O desenvolvimento desses mecanismos depende de características genéticas das espécies, que determinam a presença de substâncias, como os açúcares solúveis, antioxidantes, enzimas que atuam contra a oxidação lipídica e as proteínas específicas (*late embryogenesis abundant proteins* – proteínas LEA). Apesar de ser determinado geneticamente, a presença desses mecanismos pode ser intensificada ou reduzida, de acordo com a taxa de secagem da semente ou o meio ambiente no qual a semente desenvolveu a fase final do seu desenvolvimento (GUIMARÃES, 1997). Desse modo, a realização da secagem de sementes exige a compatibilização entre os procedimentos operacionais relativos ao rendimento físico do processo e os voltados à preservação fisiológica das sementes.

Logo há necessidade de continuidade na busca de informações capazes de ampliar a base de conhecimentos sobre o tema, pois a secagem das sementes ortodoxas, após a maturidade fisiológica, não se reveste apenas de um simples processo de redução do teor de água até níveis compatíveis ao manuseio e armazenamento seguros das sementes. Sobretudo, trata-se de uma etapa do beneficiamento merecedora de cuidados especiais, tendo em vista a importância à garantia da qualidade das sementes, das mudanças físicas, fisiológicas e bioquímicas que ocorrem à medida que a água vai sendo removida.

6 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ABREU, L. A. S. et al. Behavior of coffee seeds to desiccation tolerance and storage. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 36, n. 4, p. 399-406, 2014.

AVELAR, S. A. et al. Secagem estacionária de sementes de soja com ar desumidificado por resfriamento. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 454-462, 2011.

BOCHICCHIO, A. et al. Sucrose and raffinose contents and acquisition of desiccation tolerance in immature maize embryos. **Seed Science Research**, Wallingford, v. 4, n. 2, p. 123-126, 1994.

BRYAIR. **Secado de semillas Y granos**. 2020. Disponível em: <https://www.bryair.com/pt/brazil-pt/products-solutions>. Acesso em: 26/02/2020.

CARVALHO, E. R. et al. Temperatures and periods of drying delay and quality of corn seeds harvested on the ears. **Journal of seed Science**, v. 41, n. 3, p. 336-343, 2019.

COELHO, S. V. B. et al. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de café secas em sílica gel e soluções salinas saturadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 6, p. 483-491, 2015.

ELIPAL. **Secadores de coluna**: Equipamento de secagem contínua de grãos recomendado para soja, arroz, milho e trigo. 2019. Disponível em: <http://elipal.com.br/secadores-de-colunas/>. Data de acesso em 26/02/2020.

FARIA, M. A. V. R. de et al. Qualidade fisiológica de sementes de milho colhidas em diferentes estádios de “linha de leite”. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 773-780, maio/jun., 2007.

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G. Produção de mudas de cafeeiro. In: MENDES, A. N. G.; GUIMARÃES, R. G. (eds). **Cafeicultura empresarial - produtividade e qualidade**. Lavras: UFLA/FAEPE, p.1-60.

JOSÉ, S. C. B. R.; VON PINHO, É. V. R.; DIAS, M. A. G. S. Açúcares e tolerância à alta temperatura de secagem em sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 60-68, 2006.

JOSÉ, A. C. et al. Effects of drying rate and storage time on *Magnolia ovata* Spreng. seed viability. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 39, n. 2, p. 425-434, 2011.

LEOPOLD, A. C.; VERTUCCI, C. W. Physical attributes of desiccated seeds. In: LEOPOLD, A. C. (ed.). **Membranes, metabolism and dry organisms**. Ithaca: Cornell University Press, 1986. p. 22-34.

LEPRINCE, O.; HENDRY G. A. F.; MCKERSIE, B. D. The mechanisms of desiccation tolerance in developing seeds. **Seed Science Research**, Wallingford, v. 3, n. 3, p. 231-246, 1993.

RADKE, A. K.; BATATA, M. M.; VILLELA, F. A. Secagem intermitente e a qualidade de sementes de soja associada à operação da estrutura. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 11, n. 4, p. 69-73, 2017.

ROSA, D. V. F. da. et al. Indução de tolerância à alta temperatura de secagem em sementes de milho por meio de pré-condicionamento a baixa temperatura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 3, p. 290-310, 2004.

ROSA, S. D. V. F. et al. Effects of different drying rates on the physiological quality of Coffea canephora Pierre seeds. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 17, n. 2, p. 199-205, 2005.

SANTOS, G. C.; VON PINHO, E. V. R.; ROSA, S. D. V. F. Gene expression of coffee seed oxidation and germination processes during drying. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 12, n. 4, p. 6968-6982, 2013.

SILOMAX. **Produto**: Secador intermitente. 2020. Disponível em: <https://www.silomax.com.br/produtos/secadores/produto-secador-intermitente>>. Acesso em: 26/02/2020.

SILVA, P. A. et al. Ultra-structural and physiological analysis during the development and drying of soybean seeds. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina v. 29, n. 2, p. 15-22, 2007.

VENTISEC. **Secadores de Cerais LAW**. 2020. Disponível em: <https://www.ventisec.pt/produtos/secadores-de-cereais-law>>. Acesso em: 26/02/2020.

WOLKERS, W. F. et al. Isolation and characterization of a D-7 LEA protein from pollen that stabilizes glasses *in vitro*. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure and Molecular Enzymology**, v.1544, n. 1-2, p. 196-206, 2001.

7 REFERÊNCIAS CONSULTADAS:

AVELAR, S. A.; VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Avanços na secagem de sementes - emprego de ar desumidificado por resfriamento. **Revista SEED News**, n. XVI, n. 4, 2012.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 85f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba: USP-ESALQ, 1996.

PESKE, S. T.; VILLELA, F. A. Secagem a alta velocidade. **Revista SEED News**, v. 6, n. 2, p. 22-27, 2008.

PESKE, S. T.; VILLELA, F. A. Secagem de sementes. In: PESK, S.T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELO, G. E. **Sementes: Fundamentos científicos e tecnológicos**, 2ª ed. v. 3, 2012. 573p.