

Capítulo 18

---

# **Propriedades físicas e químicas interferentes na pós-colheita do café**

*Paulo César Corrêa  
Gabriel Henrique Horta de Oliveira  
Fernando Mendes Botelho  
Pedro Casanova Treto  
Enrique Anastácio Alves*





## Introdução

O café é considerado um dos produtos agrícolas de maior importância para o Brasil, tanto pela receita gerada pela exportação e industrialização, como pelos empregos diretos e indiretos relacionados com o seu agronegócio. O café é uma das bebidas mais populares e mais consumidas diariamente no mundo. No Brasil, seu consumo fica atrás apenas do consumo de água e à frente de sucos, refrigerantes, energéticos e achocolatados, com a ressalva de que a quantidade e o tipo de bebida de café consumida dependem dos hábitos sociais, da cultura e da região (DUARTE et al., 2005).

Tradicionalmente, no Brasil, são cultivadas duas espécies do gênero *Coffea*, *Coffea arabica* L. (café arábica) e o *Coffea canephora* Pierre ex Froehner (conhecido popularmente como café robusta, conilon ou canelão, sendo que a primeira corresponde a, aproximadamente, 75% do total produzido. Os termos “robusta” e “conilon” são denominações que agrupam os grupos botânicos dos cafeeiros mais plantados no Brasil pertencentes à espécie *C. canephora*. Apesar de representar apenas 25% da produção nacional, o *C. canephora* é o que vem apresentando a maior taxa de crescimento nos últimos anos. O aumento da produção do *C. arabica*, no Brasil, no período de 1990 a 2006, foi de 35%, passando de 26,5 milhões de sacas em 1990, para 35,8 milhões de sacas em 2006, enquanto o *C. canephora*, nesse mesmo período, registrou um crescimento de 137,8%, ou seja, quatro vezes mais que o crescimento apresentado pelo *C. arabica*, 4,5 milhões de sacas em 90, para 10,7 milhões de sacas em 2006 (CONAB, 2012).

Os grãos oriundos das variedades de *C. arabica* produzem uma bebida de melhor aceitação e são mais valorizados comercialmente que os cultivares da espécie *C. canephora*. Entretanto, o *C. canephora* apresenta maior produtividade sendo uma planta mais rústica, menos susceptível a doenças e adequada a regiões de baixa altitude e de temperaturas mais elevadas, além de produzir um café mais “encorpado”, muito utilizado em misturas (*blends*) com o *C. arabica* na industrialização dos cafés torrados e moídos e na produção de café solúvel.

Para consolidação do sucesso econômico e da sustentabilidade das atividades cafeeiras são fundamentais em um modelo tecnológico de produção, ações pontuais que contemplem a melhoria da qualidade do produto. O termo qualidade para grãos é amplo e pouco preciso, visto que seu significado depende da espécie e da finalidade a que se destina o grão. No caso do café, principalmente *C. arabica*, seu valor comercial está diretamente relacionado às características qualitativas desejáveis nos grãos que estão estritamente relacionados com a bebida gerada, sendo este o principal parâmetro usado para sua comercialização.

A qualidade do café é muito afetada pela composição do grão cru, gênero, variedade, clima, altitude, época e forma de colheita e condições do processamento pós-colheita utilizados (secagem, armazenamento, torra e moagem). Os critérios comumente utilizados para avaliar a qualidade dos grãos de café incluem o tamanho, cor, forma, potencial de torra, sabor e aroma ou teste de xícara e presença de defeitos, sendo os dois últimos, os mais importantes critérios empregados mundialmente na avaliação do café (AFONSO JÚNIOR et al., 2003; FRANCA et al., 2005).

A combinação do tipo e a qualidade da bebida estabelecem o preço pelo qual o café será comercializado no mercado interno e, principalmente, no externo (AFONSO JÚNIOR et al., 2003). Portanto, o preço a ser pago por uma saca de café depende de suas propriedades físicas e químicas.

Contrariamente ao *C. arabica*, o *C. canephora* é classificado basicamente por tipo e apenas recentemente o “teste de xícara” tem sido utilizado como parâmetro qualitativo para sua comercialização por algumas empresas e cooperativas, objetivando diferenciar grupos e agregar valor a cafés de melhor qualidade, visto que muitos produtores já utilizam tecnologias que proporcionam a melhoria da qualidade como a separação dos frutos cerejas pelo processamento via úmida. Desta forma, é fundamental que pesquisas que visem avaliar as peculiaridades relacionadas às operações de secagem, armazenamento, beneficiamento de *C. canephora* sejam intensificadas para se obter um produto final de boa qualidade, possibilitando agregação de valor e a busca por nichos especializados de mercado, como ocorre para o *C. arabica*.

O conhecimento das propriedades físicas de produtos agrícolas é de fundamental importância para uma correta conservação e para o dimensionamento e operação de equipamentos para as principais operações pós-colheita de produtos agrícolas. A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos frutos e grãos do café são os principais fatores a contribuir para o adequado desenvolvimento de processos e simulações, que visem aperfeiçoar o sistema produtivo dessa cultura.

Informações concernentes ao tamanho, volume, porosidade e massa específica, dentre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos envolvendo transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares. Estes parâmetros mencionados são utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

## Legislação

A legislação relativa ao café é ampla e bem conhecida, no entanto, o teste de xícara para a bebida proveniente do café canéfora é recente, instituída pela Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003 (BRASIL, 2003), em que o café canéfora é classificado em: excelente, bom, regular e anormal. Desde 2010 foi definido um “Protocolo para Degustação de Robustas Finos (PDRF)”, que tem uma tabela de classificação mais rica em critérios que a Instrução Normativa nº8. Entretanto, a sua utilização ainda pode ser considerada incipiente no país e é seguida apenas para alguns nichos de mercado que trabalham com canéforas de bebida especial. As normas e padronizações acerca dos processos pós-colheita de café podem ser visualizadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Legislação do café.

Categoria	Documento	Órgão	Assunto
Regulamento técnico	Instrução Normativa 16	Mapa	Estabelece o regulamento técnico para o café torrado em grão e café torrado e moído
Identidade e qualidade de café	Resolução 277/05	Anvisa	Regulamento técnico para café torrado e torrado moído
	Instrução Normativa 08/03	Mapa	Aprova o regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru
Metrologia	Portaria 153/08	Inmetro	Define as quantidades permitidas para comercialização de café em embalagens
Registro	Resolução 278/05	Anvisa	Mantém a dispensa da obrigatoriedade de registro para o café
Certificação	Portaria 219/02	MDIC	Trata sobre a emissão dos Certificados de Origem do Café
	AIC 2007	OIC	Acordo Internacional do Café
Acordo Internacional do Café	Decreto N° 806	Anvisa	Aprova o texto do acordo internacional do café de 2007

## Matéria-prima

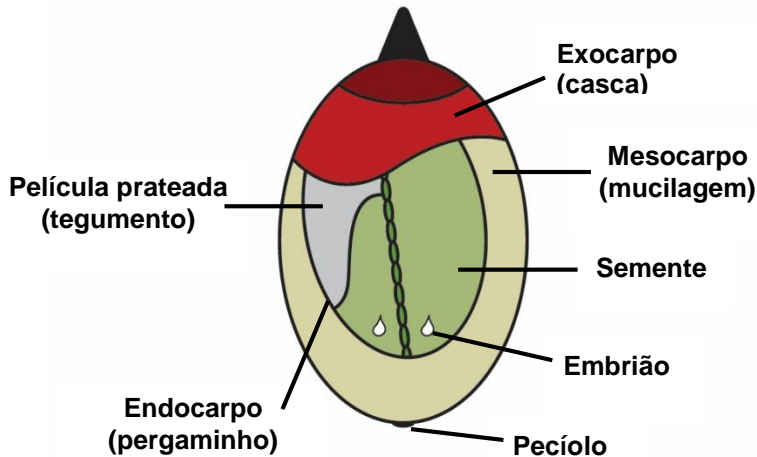
### Planta

A primeira descrição botânica de uma planta de café data de 1713. Nesse ano, Linnaeus a classificou em um gênero separado, chamando-o *Coffea*, que continha a única espécie *Coffea arabica*. Muitas outras espécies deste gênero foram identificadas durante explorações nas florestas tropicais da África, a partir da segunda metade do século 19. Os cafeeiros foram reunidos em dois gêneros, *Psilanthus* Hook e *Coffea* L. (BRIDSON; VERDCOURT, 1988; BRIDSON, 1994). Estes diferem por particularidades apresentadas nas estruturas florais. O gênero *Coffea* é subdividido nos subgêneros *Coffea* (mais de 80 espécies) e *Baracoffea* (sete espécies). São duas as principais espécies de cafeeiro: *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre. As demais espécies, embora não apresentem expressão comercial, são importantes para o melhoramento genético, pois se constituem em reservas gênicas de resistência às pragas, doenças e condições adversas de ambiente (MEDINA FILHO et al., 1984; CARVALHO; FAZUOLI, 1993).

O *Coffea arabica* é a espécie que se cultiva há mais tempo, do qual se produz um café fino e aromático, necessitando de um clima mais fresco. Sua produtividade, em comparação ao *Coffea canephora* é menor, e suas áreas de produção estão reservadas a terras altas, entre 900 e 2.000 metros. Já a espécie *C. canephora* oferece bebida mais rica em cafeína e ácido comparada ao café arábica. O café canéfora é mais adaptado a terrenos planos, com rendimentos mais elevados, além de apresentar maior resistência a pragas em relação ao café arábica. Geralmente, a florescência dura de 3 a 4 dias e 9 meses para a flor se transformar em fruto maduro; entretanto, atualmente existem variedades clonais em que o ciclo de maturação é menor.

## Fruto

O fruto desenvolvido do cafeeiro é dividido em exocarpo, mesocarpo e endocarpo, que formam o pericarpo. A semente é recoberta pelo pericarpo (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema da estrutura do fruto de cafeeiro.

Fonte: adaptado de Sousa e Silva et al. (2013).

O exocarpo (ou casca) é o tecido mais externo do fruto, em que a coloração da casca é regida pela presença de antocianina (vermelho) e luteolina, responsável pela coloração amarelada (SALAZAR et al., 1994). As células do exocarpo são estreitas e muito juntas entre si, de paredes delgadas, com presença de estômatos entre elas. Durante toda a fase de maturação do fruto o exocarpo exibe coloração verde, tornando-se amarelo ou vermelho quando o fruto atinge a maturação.

O mesocarpo é carnoso, rico em mucilagem (açúcares e pectinas), sendo muitas vezes tratado apenas como mucilagem em virtude do alto teor deste componente. É uma região extensa formada por mais de 20 camadas de células parenquimatosas, grandes, frequentemente encerrando um conteúdo de cor escura, que é considerado um material tanóide. Ele pode representar entre 22% e 31% da massa do fruto seco (ZULUAGA, 1990). De acordo com Vidal e Vidal (1995), o mesocarpo é a camada intermediária entre o exocarpo e o endocarpo e provém do mesófilo carpelar.

O endocarpo (ou pergaminho) é a estrutura mais interna do pericarpo, sendo responsável por aproximadamente 3,8% da massa do fruto seco (BORÉM, 2008). É representado por cinco a sete camadas de células menores, formando um envoltório para as sementes que se apresenta menos colorido e irá constituir no fruto maduro o pergaminho da semente (DEDECCA, 1957). Este componente baseia-se principalmente de celulose (50%), hemicelulose (20%) e lignina (20%).

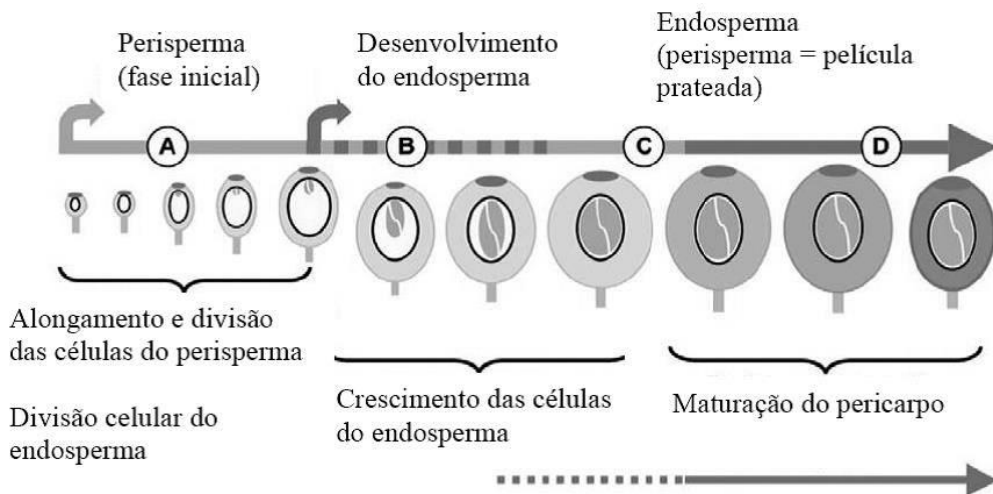
As sementes de café são formadas pela película prateada (pericarpo), pelo endosperma e pelo embrião. A manutenção do tegumento (película prateada) no processo de torrefação resulta nos grãos denominados “fox beans”; que são grãos com coloração caramelo, muito apreciado em algumas regiões. Entretanto, sua presença pode acarretar perda de qualidade com relação aos grãos imaturos: estes, na presença da película prateada, adquirem uma

coloração mais clara, deixando um aspecto ruim, além de poderem comprometer todo o lote do produto, e conferir adstringência à bebida.

A composição do endosperma (tecido de reserva) é de grande valia, pois apresenta a maior parte dos compostos responsáveis pelo sabor e aroma na bebida. Este possui frações solúveis e insolúveis em água, apresentando importantes componentes, tais como a cafeína, ácidos, proteínas, minerais, além de lipídeos.

## Desenvolvimento

O desenvolvimento do fruto de café canéfora requer de 9 a 11 meses, para seu completo amadurecimento (CANNELL, 1985) (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema gráfico das alterações que ocorrem nos tecidos durante a formação do fruto do cafeeiro. Ovário antes da antese (A), fruto imaturo: 90 dias após a floração (DAF) (B), entre 120 e 150 DAF (C), entre 230 e 240 DAF (D). O esquema corresponde ao desenvolvimento de frutos de cafeeiros *Coffea arabica* Acaiaí Cerrado MG-1474.

Fonte: De Castro e Marraccini (2006).

A maturação dos frutos do cafeeiro é caracterizada pelo aumento da atividade respiratória, síntese de etileno, metabolismo de açúcares e ácidos, degradação da clorofila e a síntese de pigmentos responsáveis pela alteração da coloração da casca dos frutos.

## Composição química

A qualidade do café é definida como o resultado da somatória de atributos físicos e químicos. Dentre os atributos químicos sobressaem: os açúcares, ácidos, compostos fenólicos, cafeína, compostos voláteis, ácidos graxos, proteínas e algumas enzimas, cuja presença, teores e atividades conferem ao café sabor e aroma peculiares (COSTA; CHAGAS, 1997).

Entre esses constituintes, são mais de quatrocentos compostos orgânicos e inorgânicos que contribuem com o sabor distinto do café, sendo que o aroma está constituído por

mais de setecentas substâncias. Muitos desses compostos se encontram ligados e não se pode determinar um único componente primário do café. Alguns quando se separam têm sabor e odor diferente do característico do café, outros são instáveis, evaporam e combinam-se formando novos compostos (MEIJA et al., 1999). Esta composição química complexa dos grãos de café depende de fatores genéticos, ambientais e condições de manejo pré e pós-colheita (PRETE, 1992). A composição química do grão de café cru está apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química do café cru.

Componente	Café Canéfora <sup>(1)</sup>	Café Arábica <sup>(1)</sup>
Cafeína	2,2	1,2
Trigonelina	0,7	1,0
Cinzas (41% correspondem a K)	4,4	4,2
Ácidos:		
• Clorogênico total	10,0	6,5
• Alifáticos	1,0	1,0
• Quínico	0,4	0,4
Açúcares:		
• Sacarose	4,0	8,0
• Redutores	0,4	0,1
• Polissacarídeos	48,0	44,0
Lignina	3,0	3,0
Pectina	2,0	2,0
Proteína	11,0	11,0
Aminoácidos livres	0,8	0,5
Lipídeos	10,0	16,0

<sup>(1)</sup> Valores expressos em g 100g<sup>-1</sup> em base seca.

Fonte: Clarke (2003)

As principais características atribuídas à bebida do café advêm do processo de torrefação, no qual os constituintes presentes no grão cru sofrem alterações durante a torra. As proteínas contribuem para o sabor da bebida do café devido à sua degradação durante o processo de pirólise na torrefação, liberando carbonilas, aminas e sulfeto de dimetila. Além disso, as partículas insolúveis da proteína ligam-se às substâncias graxas, sendo esta combinação a responsável pela turbidez da bebida no café coado.

A cafeína é um alcalóide, pertencente ao grupo das xantinas. Ela é inodora e possui sabor amargo, contribuindo com o sabor e o aroma da bebida do café. Possui também a característica de controlar o crescimento microbiano e, por conseguinte, inibe a presença de micotoxinas no café. Ela está incluída entre os excitantes psicomotores que têm, principalmente, a propriedade de estimular a atividade mental. Trigonelina é um derivado da piridina, conhecido por contribuir indiretamente para a formação, durante a torra, de aromas desejados à bebida do café (KY, 2001).

A acidez é um importante indicativo da qualidade da bebida de café, uma vez que está diretamente relacionada com o grau de fermentação empregado durante o processamento dos grãos de café. Caso a fermentação seja realizada de forma imprópria, os açúcares presentes na mucilagem podem produzir ácido acético, láctico, propiônico e butírico, sendo que estes acarretam prejuízo à qualidade. É necessário o controle da fermentação para que os ácidos málico e cítrico sejam os principais ácidos presentes no café, uma vez que estes conferem o sabor ácido característico deste



produto. Segundo Maier (1987), o grão de café contém ácidos orgânicos incluindo os ácidos clorogênicos (7%), oxálico (0,2%), málico (0,3%), cítrico (0,3%) e tartárico (0,4%). O amargor, a adstringência e o gosto de mofo da bebida de café se devem ao nível de concentração de ácidos clorogênicos e das proporções em que diferentes deles se encontram no café cru (SALVA; LIMA, 2007). Menores teores de ácido clorogênico nos grãos de café proporcionam bebidas menos adstringentes.

Assim como outros componentes químicos, o teor de açúcar nos grãos de café pode diferir por causa das variações de cultivares e estádios de maturação, bem como as condições climáticas e as características da região produtora. Durante o processo de torra de café, os açúcares reagem junto com os aminoácidos e proteínas (reações de Maillard) formando compostos desejáveis, responsáveis pela cor marrom e as características de aroma (MURKOVIC; DERLER, 2005). Além disso, valores mais elevados de açúcares podem indicar a presença de maior doçura na bebida, sendo responsáveis pela formação do sabor caramelo (ORGANIZACIÓN..., 1992).

Ainda é discutível qual o tipo e concentração de açúcares nos grãos que exerceria maior influência na qualidade da bebida. No entanto, sabe-se que a sacarose é degradada, praticamente em quase sua totalidade durante a torração, originando açúcares menores, precursores de ácidos e aldeídos, responsáveis pelo aroma. Pinto et al. (2001), que investigaram os teores de açúcares totais não redutores, e redutores em grãos torrados, não detectaram correlação linear entre os açúcares e a qualidade de bebida. A bebida estritamente mole apresentou maior teor de açúcares redutores, seguindo-se bebida dura, riada e mole, sendo que as bebidas estritamente moles e riadas obtiveram maiores teores de açúcares totais e açúcares não redutores.

As transformações bioquímicas que ocorrem no grão do café e que levam a uma depreciação da qualidade de bebida são, principalmente, de origem enzimática. Estas transformações envolvem glicosidades, polifenoloxidasas, proteases e lipases, levam a uma degradação de paredes e membranas celulares assim como mudanças na coloração do grão, e consequente prejuízo na qualidade.

A polifenoloxidase é uma enzima intracelular e encontra-se localizada, principalmente, na membrana dos cloroplastos, participando dos processos de respiração, resistência à infecção e na biossíntese de certos constituintes vegetais como os flavonoides e quinonas (ESKIN; HERDERSON, 1990). A ativação da enzima ocorre durante infecções ou injúrias mecânicas, resultando em formação de quinonas e, conseqüentemente, de polímeros insolúveis que proporcionam uma barreira prevenindo contra a expansão de infecções nas plantas.

Pimenta (1997) realizou um trabalho que determinou a atividade da polifenoloxidase e sua relação com a qualidade do café. Foram observados comportamentos bastante variados quanto aos teores destes constituintes nos diferentes estádios de maturação dos frutos; com a atividade maior da polifenoloxidase para grãos provenientes de frutos cereja, menor para frutos verdes; e intermediário para os estádios seco/passa e verde-cana. Carvalho et al. (1994) elaboraram uma tabela complementar à prova de xícara, que possibilita enquadrar os cafés nas diferentes classes de bebida segundo a atividade enzimática da polifenoloxidase. Estes autores determinaram que a atividade da polifenoloxidase diminui à medida que se diminui a qualidade do café.

Para Clifford (1999), a presença de compostos fenólicos no café em quantidades maiores que as verificadas para determinada espécie, são responsáveis pela adstringência e interferem no seu sabor sendo associadas, portanto, a desvalorização da qualidade. Estes

compostos, principalmente os ácidos caféico e clorogênicos, exercem ação protetora, antioxidante dos aldeídos. O ácido clorogênico (ACG) representa uma família de compostos fenólicos, cujo componente majoritário é o ácido cafeoilquínico (5-ACQ), presente em grande quantidade na bebida do café. O 5-ACQ foi o isômero encontrado em maior quantidade nos frutos, independente da parte do fruto analisada. De modo geral, as sementes contêm um teor muito baixo de ACG (CLIFFORD, 1985).

Fernandes (2003) estudando os teores do ácido clorogênico demonstrou que a classe de bebida dura apresentou o menor teor de ácido clorogênico (4,13%) diferindo-se dos demais blends, rio (5,00%), riada (4,82%), duro-rio (4,68%), duro-riada (4,80%) que foram iguais entre si.

Montavon et al. (2003) analisaram precursores específicos em amostras de diferentes qualidades (maduros, frutos vermelhos e imaturos e frutos verdes), ácido clorogênico, proteínas do grão verde do café e aminoácidos livres. O café maduro obteve melhor avaliação da qualidade pelo teste sensorial e foi identificada uma relação entre a maturação e o comportamento redutor da suspensão dos grãos de café. Os grãos imaturos foram mais sensíveis à oxidação por ácido clorogênico, além disso, obtiveram também menores valores para proteínas e aminoácidos livres.

Theodoro et al. (2009) caracterizaram a qualidade de grãos de cafés colhidos no pano e no chão, provenientes de sistemas de manejo orgânico, em conversão e convencional. Os cafés colhidos no chão apresentaram qualidade inferior, estando associados a maiores teores de fenólicos totais e acidez titulável. Os sistemas convencional e orgânico apresentaram melhor desempenho quando colhidos no pano, entretanto, assinalam-se diferenças quanto à maior concentração de açúcares redutores e não redutores no sistema convencional e maior atividade da polifenoloxidase, teor de cafeína e açúcares totais no sistema orgânico.

## **Propriedades físicas interferentes na pós-colheita do café**

O conhecimento das propriedades físicas dos produtos agrícolas não tem uso restrito à engenharia, podendo as informações ser de grande utilidade em outros ramos da ciência ou tecnologia relacionada com o comportamento físico e processamento de frutos e vegetais, de um modo geral. As principais aplicações desses conhecimentos se destinam ao dimensionamento adequado de máquinas utilizadas no processamento e a melhor caracterização do produto (MOHSENIN, 1986).

Projetos de máquinas para o processamento, classificação e dimensionamento de outros equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas, especialmente as propriedades geométricas.

Informações a respeito do tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de grande importância para estudos envolvendo transferência de calor e massa e movimentação de ar em massas granulares. Juntamente com o teor de água, a massa específica, a porosidade e o volume são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

## Massa específica aparente e real

Massa específica é definida como a razão entre a massa e o volume ocupado por determinado produto. Este conceito aplicado à massa e volume de apenas um grão determina a massa específica real ou unitária. Já a aplicação do conceito para uma determinada quantidade de produto estabelece a definição da característica massa específica aparente ou granular (PABIS et al., 1998), ou seja:

$$\rho = \frac{m_p}{V_p} \quad (1)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Em que:

$\rho$  = massa específica real ou unitária do produto, kg m<sup>-3</sup>.

$\rho_{ap}$  = massa específica aparente ou granular do produto, kg m<sup>-3</sup>.

$m_p$  = massa unitária do produto, kg.

$m$  = massa de produto, kg.

$V_p$  = volume unitário do produto, m<sup>3</sup>.

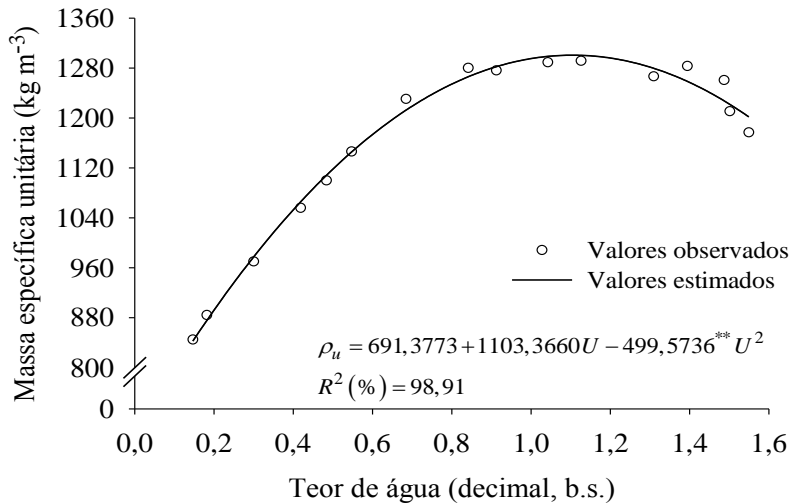
$V$  = volume ocupado pela massa de produto, m<sup>3</sup>.

A massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) pode ser determinada, para os frutos de café, utilizando-se uma balança de peso hectolitro com capacidade de 1 L. Para a determinação da massa específica real ou unitária, utiliza-se o método do picnômetro (ASTM D 792, 1991; MOREIRA et al., 1985). A massa específica aparente de grãos agrícolas cresce, geralmente, com a diminuição do teor de água do produto. O crescimento depende da porcentagem de grãos danificados, do teor de água inicial, da temperatura alcançada durante a secagem, do teor de água final e da variedade do grão (COUTO et al., 1999; BROOKER et al., 1992). Uma exceção é o café em coco, onde o volume da casca que envolve os grãos não muda na medida em que o grão perde umidade. Estes conceitos são importantes para a cultura do café no dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transporte, podendo também ser empregado para estimar os teores de água e danos causados por insetos e roedores durante o armazenamento. Os valores observados e estimados da massa específica unitária e aparente dos frutos de *C. canephora* para a faixa de teor de água avaliada estão apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Pelas Figuras 3 e 4, percebe-se que, no início do processo de secagem, as massas específicas unitária e aparente dos frutos de *C. canephora* apresentaram tendência semelhante ao observado para a maioria dos produtos agrícolas, ou seja, houve um aumento dessa propriedade à medida que a água foi sendo removida do produto. Todavia, ao atingir o teor de água de 1,126 (b.s.) para o caso da massa específica unitária e de 0,8013 (b.s.) para a massa específica aparente, inverteu-se a tendência inicial, de modo que as massas específicas começaram a diminuir com a redução do teor de água, seguindo a tendência normalmente observada para alguns produtos agrícolas que têm parte ou todo o tegumento enrijecido, como mamona (GONELI et al., 2008), girassol (GUPTA; DAS, 1997; FIGUEIREDO et al., 2011), arroz em casca (ZAREIFOROUGH et al., 2009), café (RIBEIRO et al., 2001).

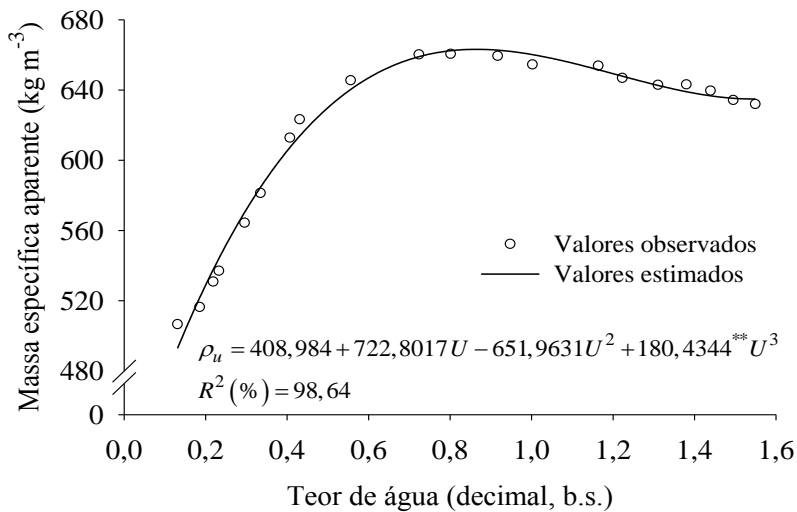
Chandrasekar e Viswanathan (1999) também observaram essa tendência estudando o efeito do teor de água sobre a massa específica do *C. arabica* e *C. canephora* com pergaminho. Esses autores observaram ainda que o *C. canephora* apresentou maiores

valores de massa específica aparente e real, em relação ao *C. arabica*, independentemente do teor de água. Afonso Júnior (2001) também observou essa tendência para a massa específica de cafés descascados e despulpados e, assim como Couto et al. (1999), Chandrasekar e Viswanathan (1999) e Ribeiro et al. (2001), atribuiu ao fato da casca e do pergaminho desses cafés se contraírem de modo diferenciado do grão, pois esse sofre mudanças volumétricas mais acentuadas que as estruturas que os envolvem.



(\*\*) Significativo pelo teste "t",  $p$ -valor < 0,001

**Figura 3.** Valores observados e estimados da massa específica unitária dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.



(\*\*) Significativo pelo teste "t",  $p$ -valor < 0,001

**Figura 4.** Valores observados e estimados da massa específica aparente dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

Os valores observados para a massa específica unitária variaram de 1176,85 a 844,69 kg m<sup>-3</sup>, para teores de água entre 1,55 a 0,1468 b.s., apresentando um valor máximo de 1291,4 kg m<sup>-3</sup> para o teor de água de 1,126 b.s. Já para a massa específica aparente, os valores variaram de 632,00 a 506,61 kg m<sup>-3</sup> para uma faixa de teor de água de 1,55 a 0,131 b.s., alcançando um valor máximo de 660,55 kg m<sup>-3</sup> para o teor de água de 0,8013 b.s.

A massa específica unitária dos frutos de *C. canephora* apresentou uma variação quadrática em relação ao teor de água. A dependência dessa propriedade ao teor de água pode ser explicada (*p*-valor < 0,001) por um modelo polinomial de segundo grau, baseando-se no elevado coeficiente de determinação (*R*<sup>2</sup> > 98,5 %). Afonso Júnior (2001) e Couto et al. (1999) relataram resultados semelhantes avaliando a dependência da massa específica unitária dos frutos de *C. arabica* em função do teor de água.

Apesar dos valores da massa específica aparente terem apresentado variação semelhante em relação ao teor de água quando comparado à massa específica unitária, a dependência entre as variáveis foi mais bem explicada por uma equação polinomial de terceiro grau. Todos os coeficientes do polinômio ajustado se mostraram significativos pelo teste “t” (*p*-valor < 0,001), e o modelo apresentou coeficiente de determinação maior que 98,5 %.

## Porosidade

A porosidade de uma massa granular é definida como a relação entre o volume ocupado pelo ar nos espaços intergranulares e o volume total desta massa. Esta propriedade é usualmente representada da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{V - V_p}{V} \quad (3)$$

Em que:

$\varepsilon$  = porosidade da massa de produto, decimal.

$V_p$  = volume unitário do produto, m<sup>3</sup>.

$V$  = volume ocupado pela massa de produto, m<sup>3</sup>.

A incorporação das equações 1 e 2 na expressão de porosidade resulta na seguinte equação:

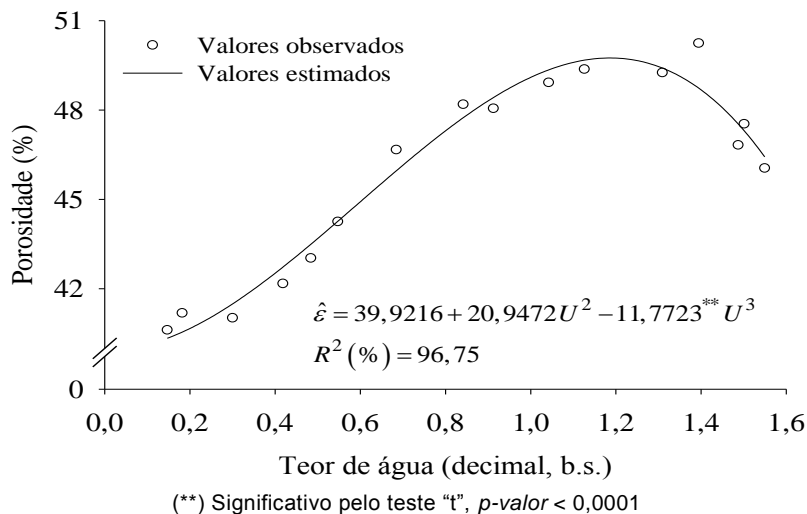
$$\varepsilon = 1 - \left( \frac{\rho_{ap}}{\rho} \right) \quad (4)$$

A porosidade de uma massa de grãos está associada à resistência que a camada de produto oferece ao movimento de ar, sendo amplamente utilizada no projeto de equipamentos de secagem e aeração (BROOKER et al., 1992).

A fração de espaços vazios de uma massa de grãos, ou porosidade, pode ser determinada pelos métodos direto e indireto. Segundo Mohsenin (1986), pelo método direto a porosidade é obtida acrescentando-se um volume de líquido conhecido e necessário para a complementação dos espaços vazios da massa granular. No método indireto, a porosidade pode ser determinada pelo uso de picnômetros, ou então, baseada em relações matemáticas (equação 4) que envolvem as massas específicas real ou aparente (COUTO

et al., 1999; RUFFATO et al., 1999). O picnômetro, ao contrário do método de complementação do volume, deve ser preferido, pois minimiza a incorporação de erros decorrentes da tensão superficial do líquido utilizado.

Alterações de características físicas como tamanho, volume, massas específicas, real e aparente e porosidade, em função do teor de água e outros fatores, durante e depois da secagem, têm sido adequadamente investigadas por diversos autores para vários produtos. De modo geral, observa-se que essas propriedades físicas, para a maioria dos produtos agrícolas, diminuem com o aumento do teor de água, enquanto a porosidade da massa granular aumenta (JAYAS; CENKOWSKI, 2006; MCMINN; MAGEE, 1997; BENEDETTI, 1987; CHUNG; CONVERSE, 1971). A Figura 5 mostra os valores da porosidade determinada indiretamente e a estimada em função do teor de água.



**Figura 5.** Valores observados e estimados da porosidade dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

A porosidade dos frutos de *C. canephora* aumentou com a elevação do teor de água, atingindo um valor máximo e reduzindo sua magnitude a partir dele (Figura 5). Os valores da porosidade da massa de frutos de *C. canephora* variaram de 40,62% a 46,05% para teores de água de 0,13 a 1,55 (b.s.) respectivamente, atingindo seu maior valor, 50,24%, quando o teor de água atingiu 1,2 (b.s.).

Couto et al. (1999) observaram resultados e tendência semelhantes ao avaliar o efeito do teor de água sobre a porosidade dos frutos de *C. arabica*, sugerindo que esse parece ser o comportamento típico para a maioria dos produtos agrícolas (curvas ajustadas passam, em geral, por um máximo). Esses autores ressaltam ainda que esse fato ocorre apesar dos valores das massas específicas unitária e aparente apresentarem comportamento diferente da maioria dos produtos agrícolas, e a porosidade ser obtida indiretamente a partir desses índices.

A porosidade da massa de frutos e grãos de café tende a crescer com a elevação do teor de umidade até um determinado valor, passando em seguida a decrescer, independentemente da forma de preparo do produto. Uma explicação para tal fato se deve às modificações estruturais associadas às alterações celulares do produto, em virtude da retirada de água durante o processo de secagem (MCMINN; MAGEE (1987). Observa-se, ainda, que para a forma de preparo natural os valores de porosidade da

massa de produto foram inferiores àqueles das formas de preparo descascado e despulpado, indicando uma possível influência da casca, alterando a forma do produto e, conseqüentemente, na acomodação dos frutos, interferindo no volume de ar presente na massa granular. Nota-se também que o comportamento da porosidade da massa de frutos e grãos de café, em função do teor de umidade, apresenta a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas estudados. No entanto, há tendência das massas específicas real e aparente do produto diferirem daquelas observadas para outros tipos de grãos.

## Forma e tamanho

O tamanho e a forma são características específicas de cada produto definidas geneticamente, que podem ser influenciadas pelo ambiente durante e após o período de sua formação e que influenciam as demais propriedades físicas do produto. Esses dados são utilizados para o dimensionamento do tamanho e da forma dos furos das peneiras em equipamentos destinados à separação e classificação.

A determinação da forma do grão por meio da comparação visual entre a sua forma e as formas-padrões é considerada uma técnica muito simples, mas bastante questionada, em razão de sua subjetividade (MOHSENIN, 1986).

A circularidade e a esfericidade são os principais parâmetros a serem definidos, ou seja, quanto mais próximos da unidade estiverem estes valores, mais próximos de um círculo ou de uma esfera estará o grão em estudo. A circularidade é a razão entre a maior área projetada do grão em repouso natural ( $A_p$ ) e a área do menor círculo circunscrito ( $A_c$ ). Já a esfericidade é a razão entre o diâmetro do maior círculo inscrito ( $d_i$ ) e o diâmetro do menor círculo circunscrito ( $d_c$ ). A esfericidade ( $\varphi$ ) é calculada utilizando-se a equação 5, proposta por Mohsenin (1986):

$$\varphi = 100 \left[ \frac{\sqrt[3]{a b c}}{a} \right] \quad (5)$$

Em que:

$\varphi$ : esfericidade, adimensional.

a: maior dimensão característica do produto, mm.

b: dimensão característica intermediária do produto, mm.

c: menor dimensão característica do produto, mm.

A circularidade (C) é determinada pela equação 6 (MOHSENIN, 1986):

$$C = 100 \left( \frac{b}{a} \right) \quad (6)$$

Os frutos e grãos, de modo geral, não apresentam um formato geométrico definido, tornando necessário para a solução de problemas relacionados à sua geometria assumir para o produto uma forma conhecida, o que acarreta em aproximações e possíveis erros (AFONSO JÚNIOR, 2001).

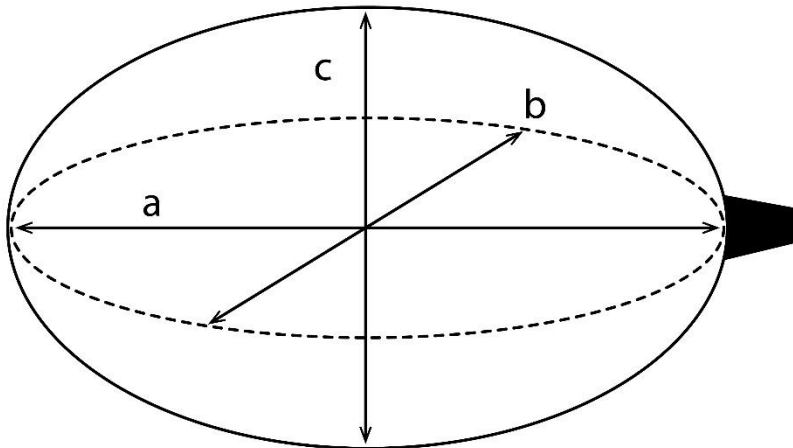
Alguns autores, entre os quais Soares (1988) e Almeida (1979), têm preferido, para estudar os processos de transferência de calor e massa durante a secagem, o uso do conceito de transformar o produto estudado em uma esfera de volume equivalente a

este e, desta forma, realizar análises como se o produto apresentasse essa geometria. Entretanto, para a maioria dos frutos e grãos, muitas dessas soluções são obtidas assumindo-se para o produto as formas geométricas de um esferoide ou elipsoide composto por três dimensões ortogonais características, que são os eixos maior, médio e menor (AGRAWAL et al., 1972). Outra solução, para alguns produtos agrícolas, consiste em aproximar, por simetria, a forma do corpo biológico a metade das formas geométricas do esferoide ou elipsoide (MOUSTAFA, 1969).

Mohsenin (1986) sugere, ainda, que o volume de alguns produtos agrícolas possa ser calculado assumindo-se a geometria de um esferoide oblato (Figura 6) aplicando-se a seguinte equação:

$$V_p = \frac{\pi a b c}{6} \quad (7)$$

Em que os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$  correspondem aos eixos maior, médio e menor, respectivamente.



**Figura 6.** Desenho esquemático de um esferoide oblato e suas dimensões características.  
Fonte: Corrêa et al. (2002).

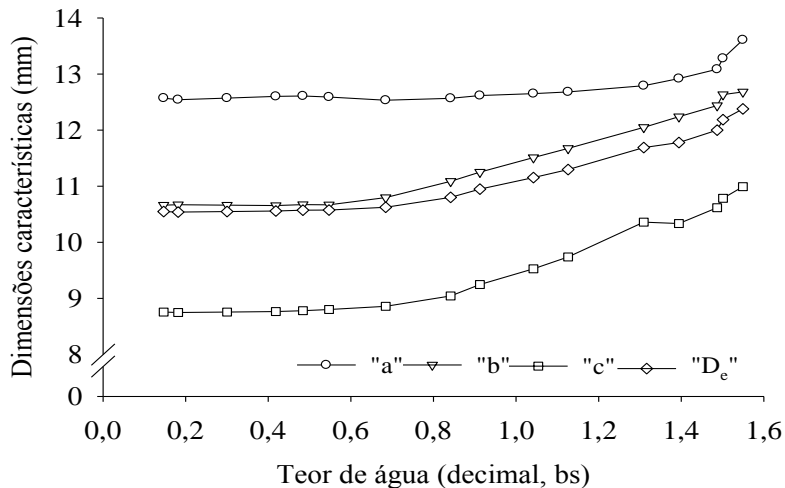
A variação das dimensões características principais ( $a$ ,  $b$  e  $c$ ) ao longo do processo de secagem, juntamente com o diâmetro equivalente (ou diâmetro geométrico) dos frutos de *C. canephora* estão apresentados na Figura 7.

Numa análise puramente descritiva da Figura 7, nota-se que, assim como as dimensões características principais, o diâmetro equivalente dos frutos de *C. canephora* diminuiu ao longo da secagem. Todavia, a redução não ocorreu para toda a faixa de teor de água analisada, mas apenas para valores mais elevados.

As dimensões características principais e o diâmetro equivalente se comportaram de maneira semelhante ao longo da secagem, de modo que a variação desses índices foi praticamente nula quando os frutos de *C. canephora* apresentaram teores de água entre 0,42 e 0,68 (b.s.). A redução total observada foi maior para as menores dimensões características, sendo de 7,6% para a maior ( $a$ ), 15,92% para a intermediária ( $b$ ), 20,3% para a menor ( $c$ ), além de uma variação de 14,8% para o diâmetro geométrico. A maioria



dos produtos biológicos porosos se contrai irregularmente nas direções longitudinal, tangencial e radial durante a secagem (FORTES; OKOS, 1980), como constataram Oliveira et al. (2011) para frutos de *C. arabica* e Corrêa et al. (2002) para frutos de *C. canephora* e *C. arabica*.



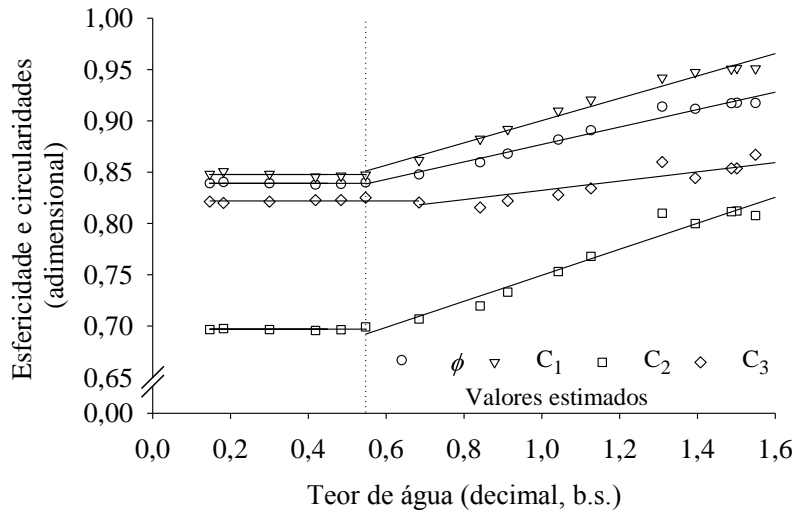
**Figura 7.** Valores observados das dimensões características principais (a, b e c) e do diâmetro equivalente ( $D_e$ ) dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

A contração volumétrica é observada durante a secagem da maioria dos produtos agrícolas. Todavia, diferentemente do café e para outros produtos agrícolas que têm parte ou todo o tegumento enrijecido, a contração se estende até teores de água recomendados para o armazenamento, que para a maioria dos grãos é de, aproximadamente, 0,149 (b.s.). Desta forma, a estagnação das dimensões características dos frutos de *C. canephora* indica que o pergaminho que envolve os grãos passou a exercer grande influência no aspecto físico do produto, evitando variações na sua forma. Essa observação pode ser confirmada analisando os dados da esfericidade e das circularidades dos frutos de *C. canephora* (Figura 8).

Observa-se que tanto a esfericidade quanto as circularidades dos frutos de *C. canephora* diminuíram linearmente com a redução do teor de água (Figura 8). Como esses fatores de forma só dependem das dimensões características principais, sua variação também só ocorreu até o teor de água de 0,55 (b.s.).

Devido a variação desproporcional das dimensões características dos frutos de *C. canephora* durante a secagem, a esfericidade diminuiu de 0,92 para o teor de água de 1,55 (b.s.), até o valor constante de 0,84 para teores de água abaixo de 0,55 (b.s.), mantendo, ainda, sua forma predominantemente esférica. Para a mesma faixa de teor de água, as circularidades para as projeções sobre a menor ( $C_1$ ) e sobre a dimensão intermediária ( $C_2$ ) variaram de 0,95 e 0,81 até valores constantes de 0,85 e 0,70, sendo esses o maior e o menor valor observado para esse fator de forma. A circularidade para a projeção sobre o maior eixo ( $C_3$ ) alcançou um valor constante para o teor de água de 0,68 (b.s.), e variou de 0,87 a 0,82. Assim, a variação mais pronunciada da circularidade se deu na menor dimensão ( $C_1$ ), indicando que os frutos de *C. canephora* se tornaram mais oblongos, vistos dessa projeção. De forma contrária, a menor variação da circularidade ocorreu para a projeção no maior eixo, indicando que as dimensões características "b" e "c" variaram numa proporção mais aproximada em relação ao teor

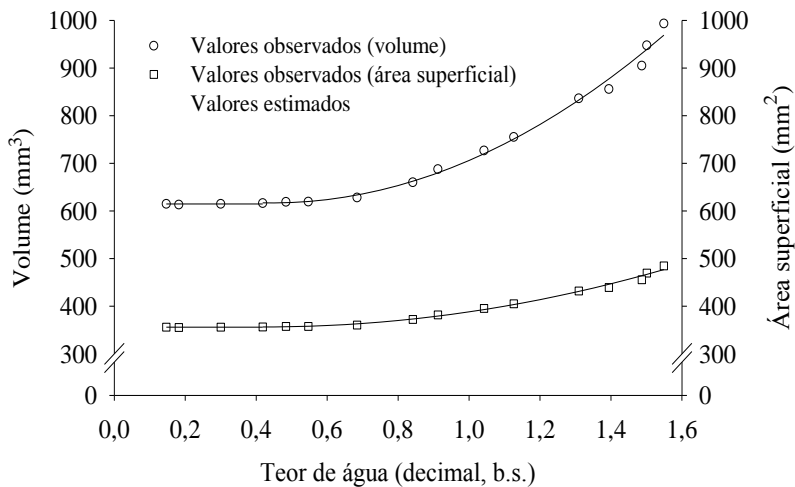
de água. Diminuições das magnitudes dessas propriedades com redução do teor de água também foram relatadas durante a secagem de café (MAGALHÃES et al., 2000; CORRÊA, et al., 2002), pinhão-manso (SIQUEIRA et al., 2012a), mamona (GONELI et al., 2011) e noz de *Areca catechu* (KALEEMULLAH; GUNASEKAR, 2002).



**Figura 8.** Valores observados e estimados da esfericidade ( $\phi$ ) e das circularidades ( $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ ) dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

Corrêa et al. (2002) compararam a variação das dimensões características principais e da forma dos frutos de *C. canephora* e *C. arabica* e verificaram que entre as duas espécies, a primeira sofreu menores alterações na sua geometria ao longo do processo de secagem, e associaram essa observação à menor quantidade de mucilagem nos seus frutos.

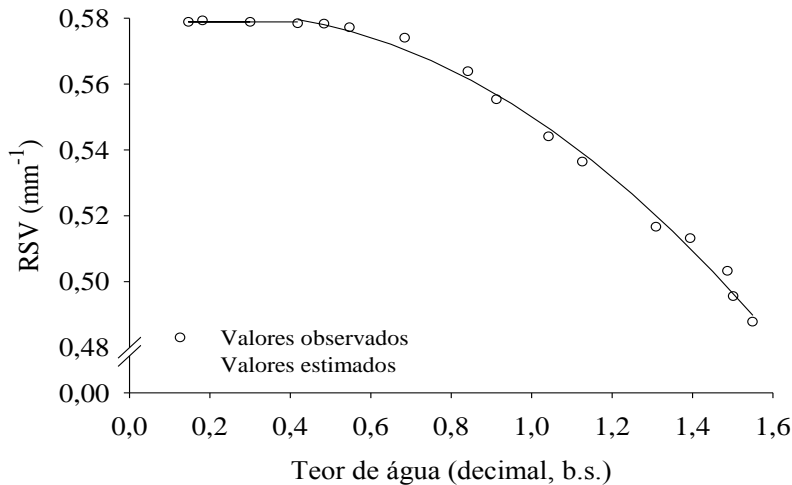
Os valores observados e estimados da área superficial e do volume para os frutos de *C. canephora* com diferentes teores de água estão apresentados na Figura 9.



**Figura 9.** Valores observados e estimados da área superficial e do volume dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

A área superficial e o volume apresentaram um comportamento quadrático em relação ao teor de água, tendendo à estabilidade, reflexo da tendência apresentada pelas dimensões características, à medida que o produto tornou-se mais seco (Figura 9). O volume variou de 993,3 a 614,61 mm<sup>3</sup>, enquanto a área superficial variou de 484,6 a 355,8 mm<sup>2</sup> para a faixa de teor de água entre 1,55 e 0,15 (b.s.). Tanto a área superficial quanto o volume se mantiveram constantes para teores de água menores que 0,42 (b.s.).

Apesar do volume e da área superficial serem dependentes basicamente das dimensões características principais do produto analisado, observa-se que ocorreu uma variação desproporcional dessas características durante a secagem: de 38,1% para o volume e de 26,6% para a área superficial. Resultados semelhantes a este foram observados por Afonso Júnior et al. (2003), avaliando a secagem de diferentes espécies de *C. arabica* e de uma variedade de *C. canephora*. Essa desproporcionalidade observada em função dessas propriedades físicas é o que explica a variação da relação superfície-volume (RSV) dos frutos de *C. canephora* durante o processo de secagem (Figura 10).

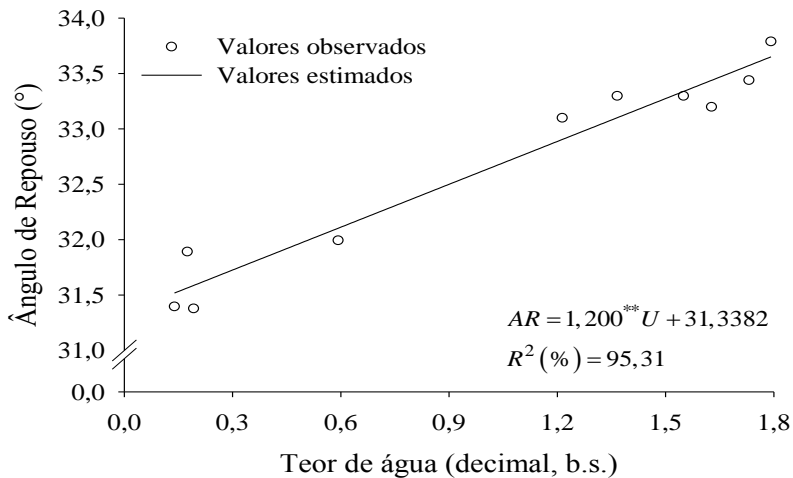


**Figura 10.** Valores observados e estimados da relação superfície-volume dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

A relação superfície-volume aumentou com a redução do teor de água apresentando o valor mínimo de 0,49 para o teor de água de 1,55 (b.s.) e máximo de 0,58 para teores de água menores que 0,42 (b.s.). Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2011) e por Siqueira et al. (2012b), avaliando a secagem de frutos de *C. arabica* e sementes de pinhão-manso, respectivamente.

## Ângulo de repouso

O ângulo de repouso dos frutos de *C. canephora* diminuiu linearmente com a redução do teor de água, variando de 33,8° a 31,4°, para uma faixa de teor de água 1,73 a 0,139 (b.s.) (Figura 11). Os valores são inferiores aos relatados por Magalhães et al. (2000), que observaram valores variando de 53,9° a 36,7° para diferentes variedades de frutos de *C. arabica* maduros (cerejas), para uma faixa de teor de água de 2,33 a 0,124 (b.s.). A dependência do ângulo de repouso ao teor de água pode ser explicada ( $p$ -valor < 0,001) por meio de uma equação polinomial simples cujo coeficiente de determinação foi de 95%.



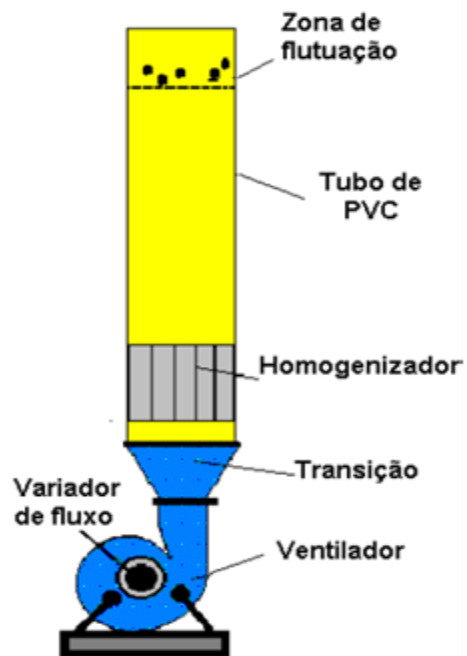
(\*\*) Significativo pelo teste "t",  $p$ -valor < 0,001

**Figura 11.** Valores observados e estimados do ângulo de repouso dos frutos de *C. canephora* em função do teor de água.

A diminuição do ângulo de repouso em relação à redução do teor de água é a tendência normalmente observada para a maioria dos produtos agrícolas, sendo a dependência linear entre essas variáveis também observada para sementes de coentro (COŞKUNER; KARABABA, 2007), sementes de moringa (AVIARA et al., 2013), sementes de pinhão-mansão (GARNAYAK et al., 2008) e para grãos de *C. arabica* e *C. canephora* em pergaminho (SILVA et al., 2003). O aumento do ângulo de repouso com o teor de água pode estar associado ao aumento da adesão entre as superfícies desses produtos, dificultando seu escoamento e, conseqüentemente, favorecendo a formação de maiores taludes durante sua acomodação natural.

### Propriedades aerodinâmicas

A velocidade terminal de um grão em uma máquina de separação ou de limpeza é atingida quando a força de arraste (o empuxo do ar) e o peso do grão se anulam. Na prática essa velocidade pode ser determinada experimentalmente quando o grão se encontra flutuando no ar a uma altura constante dentro de um tubo de acrílico conectado a um ventilador pela medição da velocidade de saída do ar (Figura 12). Para o café e a maioria dos produtos agrícolas a velocidade terminal decresce com a diminuição do seu teor de água.

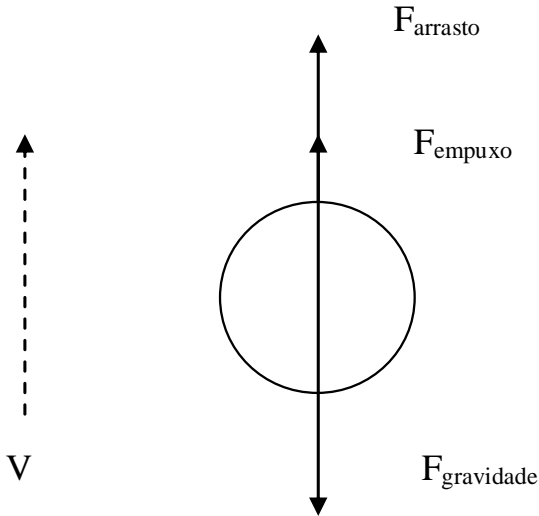


**Figura 12.** Esquema do sistema utilizado para a determinação da velocidade terminal dos produtos agrícolas.

Fonte: Corrêa; Sousa e Silva (2008).

Uma partícula em queda livre, em uma corrente de ar ascendente, está sujeita a

três tipos de forças: a força gravitacional, a força devido ao empuxo do ar e a força de resistência. Considerando a partícula: o peso atua para baixo, o empuxo para cima e a força de resistência para acima (MOHSENIN, 1986). A velocidade terminal será a velocidade constante da partícula, quando as forças citadas estiverem em equilíbrio (Figura 13).



**Figura 13.** Forças que atuam em uma partícula em movimento.

Desse modo ficaria:  $\text{Peso} - \text{Empuxo} = \text{Força de arraste}$

Segundo Fox et al. (2006), a força de arraste é dada por:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_f V^2 \quad (8)$$

Portanto:

$$m g - \rho_f g V_p = \frac{1}{2} C_D \rho_f A_p V^2 \quad (9)$$

E a velocidade terminal fica determinada por:

$$V_t = \left( \frac{2 m g (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p \rho_f C_D A_p} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Em que:

$V_t$  : Velocidade terminal da partícula,  $\text{m s}^{-1}$ .

$g$  : Aceleração da gravidade,  $\text{m s}^{-2}$ .

$m$  : Massa da partícula,  $\text{kg}$ .

$\rho_p$  : Massa específica da partícula,  $\text{kg m}^{-3}$ .

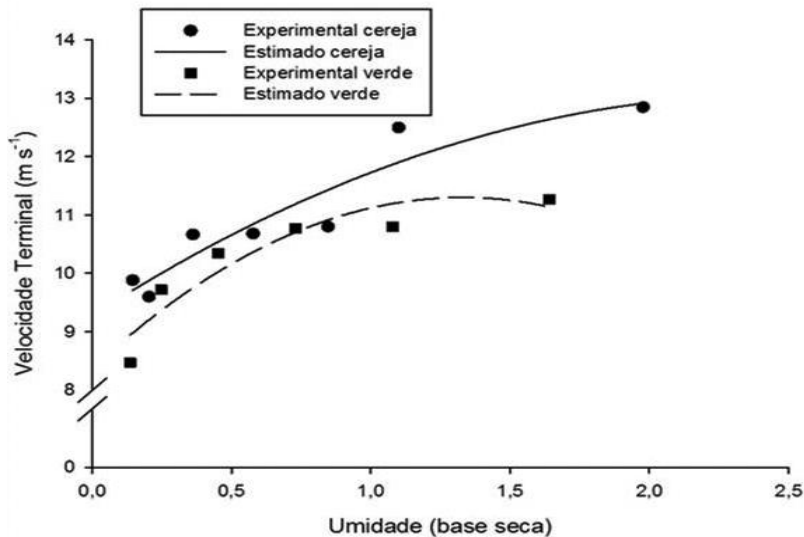
$\rho_f$  : Massa específica do fluido,  $\text{kg m}^{-3}$ .

$C_D$  : Coeficiente de arraste.

$A_p$  : Área da partícula,  $\text{m}^2$ .

Percebe-se que o coeficiente de arraste e a velocidade terminal estão ligados e não podem ser determinados individualmente somente por estas relações. O coeficiente de arraste é um adimensional aerodinâmico que depende da forma e do tamanho de uma partícula imersa em um fluxo de ar. Dois objetos com a mesma área se movendo à mesma velocidade experimentam uma força de arrasto proporcional ao seu coeficiente de arraste e coeficientes para objetos sólidos podem atingir valores bem maiores que para objetos ocos. A velocidade terminal e, conseqüentemente, o coeficiente de arrasto de uma partícula são por demais influenciados pela sua forma, tamanho e orientação, pela viscosidade do meio e pelas densidades da partícula e do fluido. Para estimar a velocidade terminal de um grão é possível utilizar na Equação 10 os valores médios do coeficiente de arraste do produto obtidos experimentalmente.

Na Figura 14 apresenta-se o comportamento aerodinâmico de frutos de café canéfora cereja e verde para diferentes valores de umidade. Pode-se observar que, semelhante ao que acontece para a maioria dos grãos agrícolas, a velocidade terminal aumenta à medida que se aumenta o teor de água dos frutos. Também se observa que os valores de velocidade terminal são superiores para os frutos maduros, quando comparados aos verdes.



**Figura 14.** Valores experimentais e estimados de velocidade terminal de frutos de café canéfora em função do teor de água do produto.

## Considerações finais

A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, o conhecimento do comportamento das propriedades físicas e químicas dos frutos de café são os principais fatores a contribuir para o adequado desenvolvimento de equipamentos, processos e simulações que visem aperfeiçoar o sistema produtivo dessa cultura. Projetos de máquinas para o processamento, classificação e dimensionamento de outros equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas, especialmente as propriedades geométricas. Informações a respeito do tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras características físicas dos produtos agrícolas, são consideradas de

grande importância para estudos envolvendo transferência de calor e massa, e movimentação de ar em massas granulares. Juntamente com o teor de água, a massa específica, a porosidade e o volume são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitar a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização.

## Referências

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORREA, P. C.; PINTO, F. A. C.; SAMPAIO, C. P. Shrinkage evaluation of five different varieties of coffee berries during the drying process. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 86, n. 4, p. 481-485, 2003.

AFONSO JÚNIOR, P. C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento**. 2001. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

AGRAWAL, K. K.; CLARY, B. L.; SCHROEDER, E. W. Matematical models of peanut pod geometry. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 30, 1972.

ALMEIDA, B. V. D. **Determinação das propriedades físicas de amêndoas de cacau**. 1979. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASTM D 792. **Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement**. Philadelphia: [ASTM], 1991.

AVIARA, N. A.; POWER, P. P.; ABBAS, T. Moisture-dependent physical properties of Moringa oleifera seed relevant in bulk handling and mechanical processing. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 42, p. 96-104, 2013.

BENEDETTI, B. C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos**. Campinas: Unicamp, 1987.

BORÉM, F. M.; MARQUES, E. R.; ALVES, E. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment Arabica coffee endosperm cells. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 99, p. 62-66, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru**. Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003. 11 p. Disponível em: < [http://www.abic.com.br/publique/media/CONS\\_leg\\_instnormativa08-03.pdf](http://www.abic.com.br/publique/media/CONS_leg_instnormativa08-03.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2012.

BRIDSON, D. M. Coffea. In: BRIDSON, D. M.; VERDCOURT, B. (Ed.). **Flora of Tropical East Africa: Rubiaceae 2**. Rotterdam: Balkema, 1988. p. 415-474.

BRIDSON, D. M. Additional notes on *Coffea* (Rubiaceae) from Tropical East Africa. **Kew Bulletin**, v. 49, p. 331-342, 1994.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Springer, 1992. p. 450.

CANNELL, M. R. G. Physiology of the coffee crop. In: CLIFFORD, M. N.; WILSON, K. C. (Ed.). **Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 108-134.

CARVALHO, A.; FAZUOLI, L. C. Café. In: FURLANI, A. M. C.; VIEGAS, G. A. (Ed.). **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1993. p. 29-76.

CARVALHO, V. D. de; CHAGAS, S. J. de R.; CHALFOUN, S. M.; BOTREL, N.; JUSTE JÚNIOR, E. S. G. Relação entre a composição físico-química e química do grão beneficiado e a qualidade de bebida do café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 3, p. 449-454, mar. 1994.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 73 (3), p. 227-234, 1999.

CHUNG, D. S.; CONVERSE, H. H. Effect of moisture content on some physical properties of grains. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 14, n. 3, p. 612-614, 1971.

CLARKE, R. J. Coffee: Green Coffee. In: CABALLERO, B.; TRUGO, L. C.; FINGLAS, P. (Ed.). **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. London: Academic Press, 2003, vol. 3. p. 1486.

CLIFFORD, M. N. Chorogenic acids and other cinnamates nature, occurrence and dietary burden. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Londres, v. 79, p. 363-372, 1999.

CLIFFORD, M. N. **Coffee**: botany, Biochemistry and production of beans and beverage. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1985.

CONAB (Brasília). **Acompanhamento da safra brasileira de café. Segunda estimativa**: maio 2010. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/2cafe\\_10.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/2cafe_10.pdf). Acesso em 13 out. 2012.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; QUEIROZ, D. M.; SAMPAIO, C. P.; CARDOSO, J. B. Variação das dimensões características e da forma dos frutos de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas Grande, v. 6, n. 3, p. 466-470, 2002.

CORRÊA, P. C.; SOUSA e SILVA, J. **Estrutura, Composição e Propriedades dos Grãos**. In: SOUSA e SILVA, J. (Ed.). Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560p. p. 19-36.

COSTA, L.; CHAGAS, S. J. R. Gourmets: uma alternativa para o mercado de café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 187, Qualidade do Café, p. 63-67, 1997.

COŞKUNER, Y.; KARABABA, E. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 80, n 2, p. 408 - 416, 2007.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M.; BASTOS, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1999.

DE CASTRO, R. D.; MARRACINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 18, n. 1, p. 175-199, 2006.

DEDECCA, D. M. Anatomia e desenvolvimento ontogenético de *Coffea arabica* L. var. *Typica* Cramer. **Bragantia**, Campinas, n. 16, p. 315-355, 1957.

DUARTE, S. M. S.; ABREU, C. M. P.; MENEZES, H. C.; SANTOS, M. H.; GOUVÊ, C. M. C. P. Effect of processing and roasting on the antioxidant activity of coffee brews. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 2, p; 387-393, 2005.

ESKIN, N. A. M.; HERDERSON, H. M. Biochemistry of foods. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1990. p. 401-427.

FERNANDES, S. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; PINTO, N. A. V. D.; NERY, M. C.; PÁDUA, F. R. M. Constituintes químicos e teor de extrato aquoso de cafés arábica (*Coffea arabica* L.) e canéfora (*Coffea canephora* Pierre) torrados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 27, n. 5, p. 1076-1081, 2003.

FIGUEIREDO, A. K.; BAÜMLER, E.; RICCOBENE, I. C.; NOLASCO, S. M. Moisture-dependent engineering properties of sunflower seeds with different structural characteristics. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 102, n. 1, p. 58-65, 2011.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Changes physical properties of corn during drying. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 4, p. 1004-1008, 1980.

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; MENDONÇA, J. C. F.; SILVA, X. A. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, v. 90 (1-2), p. 89-94, 2005.

GARNAYAK, D. K.; PRADHANA, R. C.; NAIKA, S. N.; BHATNAGARB, N. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 27, n. 1, p. 123-129, 2008.

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

GUPTA, R. K.; DAS, S. K. Physical Properties of Sunflower seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 66 (1), p. 1 - 8, 1997.



- JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. Grain property values and their measurement. In: MUJUMDAR, A. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. [Boca Raton]: CRC Press, 2006. doi: 10.1201/9781420017618.
- KALEEMULLAH, S.; GUNASEKAR, J. J. Moisture-dependent physical properties of arecanut kernels. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 82, n. 3, p. 331-338, 2002.
- KY, C. L. Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions. **Food Chemistry: an international journal**, Essex, v. 75, p. 223-230, 2001.
- MAGALHÃES, A. C.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; ANDRADE, E. T. Dimensões principais, massa e volume unitários, esfericidade e ângulo de repouso de frutos de café. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 39-56, 2000.
- MAIER, H.G. Les acides du café. *Café Cacao Thé*, Paris, v. 31, n. 1, p. 49-57, 1987.
- McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes – part I. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 33, n. 1-2, p. 37-48, 1997.
- MEDINA FILHO, H. P.; CARVALHO, A.; SONDAHL, M. R.; FAZUOLI, L. C.; COSTA, W. M. Coffee breeding and related evolutionary aspects. In: JANICK, J. (Ed.). **Plant Breeding Reviews**. Westport: AVI Publishing, 1984, v. 2. p. 157-193.
- MEIJA, G. R.; TASCÓN, C. E. O.; URIBE, J. R. S.; GALLO, J. Y. **Beneficio ecológico del café**. Chinchiná-Colômbia: Cenicafé, 1999. 300p.
- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. p. 841.
- MONTAVON, P.; DURUZ, E.; RUMO, G.; PRATZ, G. Evolution of Green Coffee Protein Profiles with Maturation and Relationship to Coffee Cup Quality. **Journal of agricultural and food chemistry**, Washington, v. 51, n. 8, p. 2328-2334, 2003.
- MOREIRA, S. M.; CHAVES, M.; OLIVEIRA, L. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v. 9, n. 1, p. 22-24, 1985.
- MOUSTAFA, S. M. A. Theoretical prediction of volume, surface area, and center of gravity for agricultural products. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 12, n. 3, p. 549-552, 1969.
- MURKOVIC, M.; DERLER, K. Analysis of amino acids and carbohydrates in green coffee. **Journal of Biochemical and Biophysical Methods**, Netherlands, V. 69, n. 1-2, p. 25-32, mar. 2006.
- OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; CAMPOS, S. C. Modeling of the shrinkage kinetics of coffee berries during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 423-428, 2011.
- ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL CAFÉ. El despulpado del café por medio de desmucilaginas mecánicas sin proceso de fermentación y su efecto en la calidad de bebida de café producido en la región de Apucarana en el Estado del Paraná en Brasil. Londres: [s.n.], 1992. (Reporte de Evaluación Sensorial).
- PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. **Grain drying: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. p.303.
- PIMENTA, C. J.; CHAGAS, S. J. R.; COSTA, L. Polifenoloxidase, lixiviação de potássio e qualidade de bebida do café colhido em quatro estádios de maturação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 171-177, fev. 1997.
- PINTO, N. A. V. D.; FERNANDES, S. M.; PIRES, T. C.; PEREIRA, R. G. F. A.; CARVALHO, V. D. Avaliação dos poli fenóis e açúcares em padrões de bebida do café torrado tipo expresso. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 7 n. 3, p. 193-195, set-dez, 2001.
- PRETE, C. E. C. **Condutividade elétrica do exsudado de grãos de café (Coffea arabica L.) e sua relação com a qualidade da bebida**. 1992. 125 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queirós”, Piracicaba.
- RIBEIRO, R. C. M. S.; BORÉM, F. M.; CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O. Porosidade e massa específica de cinco variedades de café cereja descascado. SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2002. 4 v. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, Especial Café, n. 3, p. 54-61, 2001.



RUFFATO, S.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M.; SILVA, J. N. Influência do processo de secagem sobre a massa específica aparente, massa específica unitária e porosidade de milho-pipoca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 45-48, 1999.

SALAZAR, G. M. R.; RIAÑO, H. N. M.; ARCILA, P. J.; PONCED, C. A. Estudio morfológico, anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. **Cenicafe**, Colômbia, v. 45, n. 3, p. 93-105, 1994.

SALVA, T. J. G.; LIMA, V. B. A composição química do café e as características da bebida e do grão. **O Agrônômico**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 57-59, 2007.

SILVA, R. F. **Qualidade do café cereja descascado produzido na região Sul de Minas Gerais**. 2003. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in *Jatropha* seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 3, p. 231-238, 2012a.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOARES, F. A. L. Forma e tamanho dos frutos de pinhão-manso durante a secagem em cinco condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n. 8, p. 864-870, 2012b.

SOARES, N. F. F. **Análise experimental do método de sonda para medição de condutividade térmica de grãos**: aplicação para milho (*Zea mays* L.). 1988. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOUSA e SILVA, J.; MORELI, A. P.; SOARES, S. F.; DONZELES, S. M. L.; VITOR, D. G. **Produção de Café Cereja Descascado – Equipamentos e Custo de Processamento**. Brasília: Embrapa, 2013.16 p. (Comunicado Técnico, nº 4).

THEODORO, V. C. de A.; MENDES, A. N. G.; GUIMARÃES, R. J. Resposta de lavouras cafeeiras em transição agroecológica a diferentes manejos de solo. **Coffee Science**, Lavras, MG, v. 4, n. 1, p. 56-66, 2009.

VIDAL, W. N.; VIDAL, M. R. R. **Botânica organografia**. 3.ed. Viçosa, MG: UFV, 1995. 114 p.

ZAREIFOROUGH, H.; KOMARIZADEH, M.H.; ALIZADEH, M.R. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, Taiwan, v. 1, n. 3, p. 132-139, 2009.

ZULUAGA, V. J. **Chemical Properties of coffee**. [S.l.: s.n.], 1999, v. 2.