

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



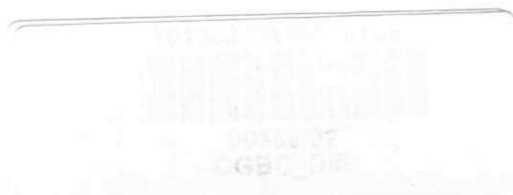
Centro de Ciências
e Tecnologia

DISSERTAÇÃO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

PREDIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO FRUTO DA
GOIABEIRA (*Psidium guajava* L.)

MARIA ELESSANDRA RODRIGUES ARAÚJO

Campina Grande - Paraíba
OUTUBRO - 2001



MARIA ELESSANDRA RODRIGUES ARAÚJO

PREDIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DO FRUTO DA GOIABEIRA

(Psidium guajava L.)

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de concentração: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

Orientadores: Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida – DEAg/CCT/UFPB

Prof^a Dr^a Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia – DEAg/CCT/UFPB

CAMPINA GRANDE – PB

2001



A663p Araujo, Maria Elessandra Rodrigues
Predicao da cinetica de secagem do fruto da goiabeira
(*Psidium guajava* L.) / Maria Elessandra Rodrigues de
Araujo. - Campina Grande, 2001.
79 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Cinetica de Secagem 2. Goiaba 3. Equilibrio
Higroscopico 4. Planejamento Experimental 5. Dissertacao I.
Almeida, Francisco de Assis Cardoso II. Gouveia, Josivanda
Palmeira Gomes de III. Universidade Federal da Paraiba -
Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 631.563:582.883(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

MARIA ELESSANDRA RODRIGUES

Título: "Predição da Cinética de Secagem para o Fruto da Goiabeira (*Psidium guajava*, L.)".

BANCA EXAMINADORA

Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida-Orientador

PARECER

Josivanda P. Gouveia
Dra. Josivanda Palmeira Gide Gouveia-Orientadora

Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva-Examinador

Dr. Humberto Silva-Examinador

OUTUBRO - 2001

*A minha família em especial aos
meus pais, Raimundo e Maria pelo
exemplo de dignidade, dedicação e
amor.*

*Minha admiração, respeito, gratidão
e meu amor.*

Michel pelo carinho e cumplicidade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas graças que vem operando em minha vida.

Aos professores Josivânda Palmeira Gomes de Gouveia e Francisco de Assis Cardoso, pelas orientações, interesse e estímulo durante a realização deste trabalho.

Aos professores Flávio Luiz e Humberto Silva pelas valiosas correções que melhoraram o trabalho.

CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado.

Aos professores Flávio Luiz e Odelsia Sanchez pela valiosa colaboração.

Aos funcionários do Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química: José Lopes e Nogueira pelo auxílio técnico e receptividade.

A meus irmãos: Marcondes e Miltom, irmãs: Estela, Lúcia, Mércia, Márcia e sobrinhos: Artur, Rodolfo, Renata, Max e Luzia pelo apoio, carinho e dedicação.

A Michel pela dedicação, carinho e paciência.

Aos amigos, Manasés, Silvana, Ailton, Rogaciano, Rodrigo, Rivanilda, Benedito e todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho. A todos meu muito obrigado.

*É graça divina começar bem.
Graça maior insistir na
caminhada certa. Mas a graça
das graças é não desistir nunca.*

D.Helder Câmara

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 – INTRODUÇÃO	15
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Goiaba	17
2.1.1. Origem e histórico da goiaba	17
2.1.2. Aspectos botânicos	17
2.2. Equilíbrio higroscópico	18
2.2.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas	20
2.3. Secagem	25
2.3.1. Período de secagem à taxa constante	26
2.3.2. Período de Secagem à Taxa Decrescente	26
2.3.3. Avaliação da cinética de secagem de frutas	27
2.3.4. Secadores de leito fixo	29
2.4. Calor isostérico de sorção	29
2.5. Planejamento e otimização de experimentos	30
2.5.1. Metodologia de superfícies de resposta	31
3 – MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1. Matéria-prima	34
3.2. Método	34
3.2.1. Determinação do conteúdo de umidade	34
3.2.2. Equilíbrio higroscópico	35
3.2.3. Ajuste dos modelos	36

3.2.4.	Calor isostérico de sorção	39
3.2.5.	Planejamento fatorial	40
3.2.6.	Curvas de secagem	43
4 –	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1.	isotermas de sorção	45
4.2.	Cinética de secagem	49
4.3.	Planejamento fatorial	50
4.4.	Calor isostérico de sorção.	64
5 –	CONCLUSÕES	68
6 –	SUGESTÕES	69
7 –	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
8 –	APÊNDICE	77

LISTA DE FIGURAS

1	Secador de leito fixo	43
2	Isotermas de dessorção da goiaba para cinco temperaturas, ajustadas pelo modelo de GAB	49
3	Cinética de secagem da goiaba para cinco temperaturas e cinco velocidades do ar de secagem	50
4	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 5 (a) e 10 (b) minutos	60
5	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 15 (a) e 20 (b) minutos	61
6	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 25 (a) e 30 (b) minutos	62
7	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 40 (a) e 50 (b) minutos	63
8	Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para o tempo de 60 minutos	64
9	Curvas do $\ln(a_w)$ versus $1/T$ baseadas na equação de Clausius-Clapeyron	65
10	Calor isostérico de sorção em função do conteúdo de umidade da goiaba, ajustado pela equação de Sopade e Ajisegiri	67

LISTA DE TABELAS

1	Valores das umidades relativas obtidas com as soluções salinas nas cinco temperaturas estudadas	35
2	Valores reais e os níveis dos fatores do planejamento fatorial completo (2^2) estudado	40
3	Valores reais e os níveis dos fatores do planejamento fatorial completo ($2^2 +$ "configuração estrela")	41
4	Matriz do planejamento dos experimentos em sua forma codificada e real	41
5	Forma empregada na apresentação estatística dos dados que validam os equações testadas	42
6	Valores experimentais de umidade de equilíbrio (U_{eq}) para dessorção de água em goiaba e atividade de água (a_w) numa faixa de 0,31 a 0,82 e temperaturas de 40 a 70°C	45
7	Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção da goiaba para as temperaturas nas faixas de 40 a 70°C	46
8	Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras de goiaba	52
9	Efeitos principais da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade do goiaba, para diferentes tempos de secagem	52
10	Resultados da análise de variância para o modelo quadrático (a) e linear (b) no tempo de 15 minutos	54
11	Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 5 (a) e 10 (b) minutos	55

12	Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 20 (a) e 25 (b) minutos	56
13	Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 30 (a) e 40 (b) minutos	57
14	Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 50 (a) e 60 (b) minutos	58
15	Valores do calor isostérico de sorção da goiaba	65
16	Parâmetros, coeficiente de determinação e desvio médio relativo (P) do ajuste da equação de Sopade e Ajisigiri (1994), para os dados do calor isostérico de sorção (Q_{st}) e da umidade de equilíbrio (U_{eq}) da goiaba	66
	APÊNDICE	77
A1	Resultado da cinética de secagem da goiaba	77
A2	Resultado da análise de variância para o tempo 5 minutos	78
A3	Resultado da análise de variância para o tempo 10 minutos	78
A4	Resultado da análise de variância para o tempo 15 minutos	79
A5	Resultado da análise de variância para o tempo 20 minutos	79

RESUMO

Neste trabalho foi estudado a cinética de secagem da goiaba (*Psidium guajava L.*), variedade *vermelha*, em leito estático sob camada fina para as temperaturas e velocidade do ar de secagem variando de 76 a 100°C e 0,8 a 2,2 m.s⁻¹, respectivamente, conforme planejamento experimental (2² + configuração estrela). Visando a otimização do processo de secagem analisou-se a influência da temperatura e velocidade do ar de secagem com o intuito de obter modelos empíricos que representasse esse processo através do planejamento experimental. As isotermas de dessorção da goiaba foram obtidas pelo método gravimétrico estático com temperaturas variando de 40 a 70°C e umidade relativa 0,31 a 0,82, obtidas com soluções saturadas de sais. Os dados experimentais foram ajustados através de regressão não linear pelas equações de GAB, BET, Halsey, Smith e Oswin, escolhendo-se o melhor mediante o valor do coeficiente de determinação (R²) e o desvio médio relativo (P). A equação de GAB e Oswin foram as que melhores se ajustaram aos dados experimentais, podendo ser escolhidas para representar a dessorção deste produto. No entanto, a equação de GAB foi escolhida por ser uma equação triparmétrica e amplamente utilizada por pesquisadores para descrever o comportamento de isotermas de sorção de diversos produtos agrícolas. Calculou-se o calor isostérico de sorção em função da umidade da amostra. Observou-se através das curvas de secagem que, quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem e a perda de umidade tende a estabilizar num período de aproximadamente 90 minutos, concluindo-se que a temperatura é o fator de maior influência na secagem deste produto, a taxa de secagem foi influenciada pela velocidade do ar de secagem em temperaturas na faixa de 100°C e velocidade do ar maior que 2 m.s⁻¹, o modelo de segunda ordem foi o que obteve os valores de maior significância estatística, com maiores valores de R² e a relação de F calculado frente ao F tabelado foi no mínimo 11 vezes maior, revelando-se amplamente satisfatório para fins preditivos.

RESUMEN

En este trabajo se estudió la cinética de secaje del *Pisidium guajava* L., variedad *roja*, en camada delgada para las temperaturas del aire de secaje en el rango de 76 a 100 °C y 0,8 a 2,2 m.s⁻¹, respectivamente, según la planificación experimental (2² + configuración estrella). Buscando la optimización del proceso de secaje se analizó la influencia de la temperatura y velocidad del aire de secado con la intención de obtener los modelos empíricos que presentarse los procesos a través de la planificación experimental. Las isotermas de desorción fueron obtenidas por el método gravimétrico estático con temperaturas que variaron entre 40 y 70 °C y la humedad relativa de 0,31 a 0,82, obtenidas con soluciones saturadas de sales. Los datos experimentales se ajustaron por regresión no lineal mediante las ecuaciones de GAB, BET, Halsey, Smith y Oswin, empleando el coeficiente de determinación (R²) y la desviación relativa (P) para se eleji el mejor modelo. La ecuación de GABE y Oswin fueron las que mejor se ajustaron a los datos experimentales, pudiendo las mismas representar la desorción de esto producto. Sin embargo, la ecuación de GABE fue elegida por ser una ecuación triparamétrica y incontablemente empleada por investigadores para describir las isotermas de sorción de varios productos agrícolas. El calor isoterico de sorción fue calculado en función de la humedad de la muestra. Se observó tras las curvas de secaje que, cuanto mayor la temperatura, más grande es la tasa de secado y la pérdida de humedad tiende a se estabilizar en un período al rededor de 90 minutos, se concluyendo que la temperatura es el factor de influencia de mayor importancia en el secado de este producto, la tasa de secaje fue influenciada por la velocidad del aire se secaje en las temperaturas prójimas de 100 °C y velocidad del aire mayor que 2 m.s⁻¹, el modelo cuadrático fue el que obtuve los mejores valores de significación estadístico, con valores mayores de R² y la relación de F calculado frente a F tablado fue, cuando pequeño, 11 veces mayor que este, revelándose satisfactorio para fines predictivos predicción .

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a produção da goiabeira em escala industrial, data da década de 70, onde é referenciado plantações em grandes pomares voltados para o comércio, para a exportação e para a indústria de doces e sucos. A produção se sofisticou e a qualidade e produtividade das árvores aumentaram consideravelmente, permitindo a adaptação da produção aos padrões internacionais, assim, a fruta nativa ganhou *status* de nobreza até chegar a uma produção de grandes quantidades anuais, especialmente obtidas nos pomares bem cuidados do sudeste do Brasil onde se destaca a região de Ribeirão Preto em São Paulo, e das super plantações irrigadas do vale do rio São Francisco, na Bahia e em Pernambuco. No entanto, para atender as exigências do mercado atual, os produtores desta fruta vêm enfrentando dificuldades, com os baixos preços alcançados pela venda associada às barreiras fitossanitárias impostas aos produtores nacionais no exterior, exigindo, para retomada do crescimento, a utilização de técnicas que contribuam para a comercialização da goiaba dentro de padrões já adotados e reconhecidos nesses mercados. Nesse sentido, todas as ações que contribuam a incrementar a qualidade e a reduzir os custos de produção são fortes aliadas aos produtos nacionais.

Devido a perecibilidade da goiaba, faz-se necessário o seu processamento de modo a obtê-las na forma adequada para preservá-las por um longo período de tempo. Para tanto, existe a necessidade de remoção de certa quantidade de água. O processo que envolve a remoção de água de produtos biológicos é denominado de secagem, e esta operação, provavelmente é o método mais antigo de conservar o alimento por longos períodos (Vázquez et al., 1997). Este processo permite a preservação dos alimentos pela remoção de água concedendo a redução do crescimento microbiano e prevenindo o desenvolvimento da maioria das reações bioquímicas que ocorre na presença de umidade.

Sendo a goiaba um material higroscópico, pode facilmente perder ou ganhar umidade para o ambiente onde estiver até entrar em equilíbrio com o meio. Desta forma, a umidade de equilíbrio de um material higroscópico é relevante no estudo da secagem porque fornece o teor de umidade mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições do ar de secagem (Gouveia et al., 1999a).

Com o intuito de contribuir para que o setor frutícola produza mais alimentos para a população, proporcionando segurança alimentar e fornecendo mais matéria-prima para a indústria de transformação, este trabalho teve como objetivo primeiro estudar a cinética de secagem da goiaba utilizando um secador de leito fixo e também o de determinar o efeito da temperatura e a velocidade do ar, as isothermas de sorção e obtenção de um modelo de secagem que represente satisfatoriamente os dados experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Goiaba

2.1.1. Origem e histórico da goiaba

A goiabeira (*Psidium guajava* L.) é originária da região tropical da América do Sul, havendo a suposição de que o centro de origem se estende desde o Sul do México até a América do Sul. Esta espécie encontra-se amplamente difundida em todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo (Medina, 1978), destacando-se por sua excelente qualidade. Além do consumo *in natura*, é de grande importância na indústria de doces no preparo de geleias, pastas, frutas em calda, purê, base para bebidas, refrescos, vinhos, polpa congelada, entre outros. Do seu valor nutricional, o baixo teor calórico e o seu elevado teor de vitamina C é superado apenas pela acerola. Quanto a forma do fruto, acredita-se que a goiaba selvagem era redonda, muito colorida e de sabor desagradável, fruto piriforme seria resultado da domesticação da planta (Gonzaga Neto e Soares, 1994).

2.1.2. Aspectos botânicos

A goiabeira pertence ao gênero *Psidium*, da família *Myrtaceae*. É um arbusto ou árvore de pequeno porte (Koller, 1979) que em pomares adultos pode atingir de três a seis metros de altura. As folhas são opostas, tendo formato elíptico longo e caem após a maturação. As flores são brancas, hermafroditas e eclode em botões isolados ou em grupos de dois ou três, sempre na axila das folhas e nas brotações surgidas em ramos maduros. Os frutos são bagos com tamanho, forma e coloração de polpa variável em função da cultivar. A frutificação começa no segundo ao terceiro ano após o plantio no local definitivo,

dependendo principalmente dos tratos culturais dispensados na fase de formação do pomar, inclusive na produção das mudas (Gonzaga Neto e Soares, 1994).

2.2. Equilíbrio higroscópico

A importância da obtenção de dados experimentais de atividade de água dos produtos agrícolas é bem conhecida, tendo-se em vista o valor do mesmo nas inúmeras aplicações no campo da secagem, da armazenagem e no manuseio de produtos agrícolas. Atualmente, tem-se empregado esforços para a obtenção de equações que expressem a atividade de água de cada produto em função da temperatura e da umidade relativa do ar.

Os valores de atividade de água de produtos biológicos dependem, principalmente, da temperatura e da umidade relativa do ar, da espécie e, ou, variedade do produto. A maturidade fisiológica, o histórico do produto e a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido influenciam na atividade de água (Brooker et al., 1992).

Segundo Rizvi (Yoshida, 1997) o conhecimento das propriedades termodinâmicas envolvendo o comportamento de sorção da água em alimentos é importante para o processo de desidratação do mesmo, no que diz respeito à obtenção de dados sobre a concentração de equilíbrio de água em alimentos e para analisar o transporte de massa e calor durante o processo. As relações envolvidas no equilíbrio água-alimento, pode ser compreendida, supondo o alimento como um sistema em equilíbrio termodinâmico com o meio, a temperatura e umidade relativa constante como está no equilíbrio, e o potencial químico da água no alimento que deve ser igual ao do vapor da água ao redor dele.

Spiess e Wolf (Gouveia, 1999) definem a atividade de água (a_w) como sendo o conteúdo de umidade que este alimento apresenta quando a pressão de vapor da água em sua superfície (P) se iguala a pressão de vapor da água do ar que envolve o alimento (P_o), conforme a Equação 1.

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{\%UR}{100} \quad (1)$$

Por ser o alimento formado de água e matéria seca, e contendo: proteínas, vitaminas, sais minerais, entre outras, a atividade de água não é somente função do conteúdo de água, mas também destas substâncias as quais exercem o efeito de ligação de água na estrutura do alimento. O conteúdo de água no alimento não fornece indicações da sua distribuição, se toda água está ligada do mesmo modo ao alimento como também não fornece indícios sobre as propriedades que esta água terá, tendo em vista a composição do alimento (Bobbio e Bobbio, 1992).

As isotermas de sorção podem ser descritas como a relação entre a atividade de água, ou da pressão parcial de vapor de um produto em função do seu teor de umidade a uma dada temperatura; é uma predição da capacidade do produto adsorver ou dissolver água. Estes dados são indispensáveis para produtos alimentícios, no desenvolvimento de processos e no controle de qualidade das indústrias de alimentos, isto porque, as isotermas tem ampla aplicação no campo da secagem, embalagem e armazenamento.

As isotermas são classificadas como sendo de adsorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umedecimento, ou de dessorção, quando o alimento inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para adsorção sendo medidos neste caso a diminuição de peso do alimento, provocada pela perda de água. Frequentemente há diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção para o mesmo produto e em condições idênticas de determinação, fenômeno a que se denomina histerese.

A isoterma pode ser dividida em três regiões dependendo do estado de água presente: a primeira região, a qual cobre a faixa de a_w de 0 até cerca de 0,35, representa a adsorção da monocamada molecular de um filme de água. A segunda região, entre 0,35-0,60 representa a adsorção das camadas adicionais de água sobre a monocamada. Finalmente a terceira região, acima de 0,60 a_w , representa a região onde a água se condensa nos poros do material e solubiliza compostos solúveis presentes (Gabas, 1998).

Para determinação experimental da atividade de água torna-se necessário um ambiente com umidade relativa controlada. O método de controle de umidade relativa mais usado é o que utiliza compostos químicos, tais como soluções aquosa de ácido sulfúrico e soluções de sais. Cada solução apresenta um grau de ajuste de umidade relativa que pode ser obtido variando-se a concentração das soluções a diferentes temperaturas.

O estudo das relações entre a atividade de água e o teor de umidade em equilíbrio de um produto, em condições de temperatura constante, pode ser obtido mediante métodos, diretos e indiretos. Entre os métodos diretos, destaca-se o gravimétrico, que além de fornecer informações completas da curva de sorção do produto, é de simples aplicação. O método gravimétrico consiste em medir o teor de umidade das amostras, após atingirem o equilíbrio, quando colocadas sob diversas umidades relativas conhecidas. Estas são obtidas através de soluções salinas saturadas, com atividade de água entre 0,1 até 0,9, utilizando sais que mudam pouco sua solubilidade com a temperatura (Noreña et al., 1996). Segundo os mesmos autores as soluções saturadas são colocadas em pequenos potes, sob vácuo ou não. Estes são colocados em câmaras de temperaturas constantes (estufa de convecção forçada) ou banhos termostáticos, por um período de tempo previamente determinados até atingir a umidade de equilíbrio, o que é verificado pela constância de peso da amostra. Deve-se ressaltar que, o controle da temperatura deve ser eficiente, evitando, a condensação da água da amostra.

Sobre o tema, Greenspan (1977) determinou valores de atividade de água para uma faixa que abrange intervalos de 5°C, com o emprego de 28 soluções aquosas saturadas de sais, dispostos em tabela para facilitar seu uso pela pesquisa.

2.2.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas

Para o estabelecimento das curvas teóricas, têm sido utilizadas relações matemáticas empíricas, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido foi capaz de prever com precisão a atividade de água de produtos agrícolas em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar (Brooker et al., 1992).

Dentre as diversas equações utilizadas para expressar a atividade de água dos produtos agrícolas, mais especificamente de frutas, em função da temperatura e umidade relativa, as mais comuns, por sua relativa precisão e generalidade podem ser citadas a de GAB, BET, Oswin, Smith e Halsey (Gabas, 1998; Prado, 1998; Unadi et al. 1998; Corrêa e Almeida, 1999; Moura, 2001).

Wang e Brennan (1991) estudaram a atividade de água em batatas para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, utilizando o método gravimétrico e vários modelos matemáticos para ajuste dos dados experimentais tendo observado influência da temperatura sobre as isotermas de sorção, ou seja, o conteúdo de umidade de equilíbrio aumenta com o decréscimo da temperatura.

Samaniengo-Esguerra et al. (1991) utilizaram o modelo de GAB para ajustar isotermas de sorção de três produtos secos: cebola, feijão verde e damasco, em três temperaturas. Concluíram que a equação de GAB encontrada por análise de regressão não linear mostrou-se adequada para descrever os dados destes produtos.

Iglesias e Chirife (Prado et al., 1999) determinaram o conteúdo da umidade da monocamada (X_m) para a equação de BET a partir de dados da literatura de isotermas de sorção para uma grande variedades de alimentos, mediante linearização do seu modelo. Concluíram que o valor de X_m diminui significativamente com o aumento da temperatura e que isso pode ser atribuído a redução do numero de zonas ativas como resultado de mudanças físicas e, ou, químicas induzida pela temperatura. Lomauro et al. (1985) verificaram que a equação de GAB pode representar com grande precisão isotermas para mais de 50% de frutas, vegetais e carnes, quando comparadas com equações de dois parâmetros.

Langmuir (Almeida et al., 1999) assumiu que, no equilíbrio, a taxa em que moléculas se condensam na superfície, é igual à taxa em que elas evaporam. A equação proposta é a seguinte:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C.a_w}{1+C.a_w} \quad (2)$$

em que:

a_w = atividade de água, adimensional;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

C = parâmetro variando com o ar, temperatura e natureza do produto.

As teorias de adsorção física de BET foram estudadas por Guggenheim, Anderson e De Boer (Prado, 1998) os quais descrevem uma equação triparamétrica, conhecida como GAB, que permite ajustar dados de sorção de produtos agrícolas até a atividade de água de 0,9.

Halsey (Prado et al., 1999) desenvolveu uma equação, considerando que a condensação ocorre em multicamadas a uma distância relativamente grande da superfície. Assumindo que a magnitude do parâmetro "b" caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se b é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície, e se b é pequeno, as forças de atração predominante são de Van der Waals, e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície.

Chirife e Iglesias (Gouveia et al., 1999a) simplificaram a equação de Halsey, e encontraram resultados satisfatório para mais de 220 isotermas experimentais testadas.

Oswin desenvolveu um modelo baseado na expansão de uma serie matemática para curvas sigmoidais aplicadas a isotermas (Silva et al., 2000).

Uma das equações mais conhecidas e aplicadas para antecipar a atividade de água em grãos foi desenvolvida por Henderson (1952), a qual pode ser descrita como segue:

$$1 - UR = \exp \left[-a \cdot T_{\text{abs}} \cdot (X_e^b) \right] \quad (3)$$

em que:

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

a e b = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto;

UR = umidade relativa;

T = temperatura absoluta, K.

Posteriormente, foram propostos vários modelos, onde se destaca os de:

1. Chung e Pfost:

$$X_e = e - f \cdot \ln(-R \cdot (T + c) \cdot \ln(UR)) \quad (4)$$

em que:

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

R = constante universal dos gases;

e, f, c = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto;

T = temperatura absoluta, K.

2. D'Arcy-Watt:

$$X_e = \frac{k_1 k_2 a_w}{1 + k_1 a_w} + k_5 a_w + \frac{k_3 k_4 a_w}{1 - k_3 a_w} \quad (5)$$

em que:

a_w = atividade de água, adimensional;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

3. Saravacos et al. (1986):

$$\psi = \ln a_w = k_1 k_2 \quad (6)$$

$$\psi = \left(\frac{1}{380,5} - \frac{1}{T} \right) - 1 \quad (7)$$

em que:

a_w = atividade de água;

ψ = potencial químico, $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

k_1 e k_2 = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto;

T = temperatura absoluta, K.

Gabas (1998) analisou dados de atividade de água, utilizando método gravimétrico, da uva Itália para temperaturas na faixa de 35 a 75°C, de atividade de água de 0,1 a 0,9, utilizando vários modelos matemáticos para ajuste dos dados experimentais, concluindo que a equação de GAB, foi a que melhor ajustou as isotermas de dessorção do referido produto. O mesmo foi observado por Kechaou e Maalej (1999) ao analisarem os dados de isotermas de dessorção da banana em uma faixa de atividade de água entre de 0 a 0,90 e temperaturas de 35, 50 e 70°C. Esta equação também mostrou-se satisfatória em descrever dados experimentais para as isotermas da casca da polpa da uva em duas temperaturas e atividade de água de 0,02 a 0,85 (Telis et al., 2000).

Moura (2001) avaliou dados de isotermas de dessorção do caju, utilizando três equações de dois parâmetros e uma equação de três parâmetros. Concluindo que a equação de GAB apresentou um melhor ajuste aos dados das isotermas do que as equações de dois parâmetros (Oswin, Smith e BET).

Kaymak-Ertekin e Sultanoglu (2001) observaram que o modelo de BET foi o melhor que se ajustou as isotermas de sorção do pimentão verde e vermelho para as temperaturas de 30, 45 e 60°C e atividade de água na faixa de 0,10 a 0,50.

2.3. Secagem

A secagem é uma das técnicas mais importantes para conservação de produtos biológicos por prepará-los para a armazenagem, visando preservar sua qualidade e valor nutricional.

O principal objetivo da secagem é a remoção da água do produto através da evaporação. Desta forma, o calor é utilizado para evaporar a umidade da superfície do produto por meio de secagem externa, utilizando geralmente o ar.

Uma vez o produto colocado em contato com o ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar, na forma de vapor da água (Perry, 1984). Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água. A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no curso da operação faz com que esta seja dividida esquematicamente em 3 períodos.

Esses três períodos são classificados como período de regime não permanente, que se caracteriza pela adaptação da temperatura do sólido molhado com o meio; a qual é seguido de um período à taxa constante de secagem, onde a temperatura do sólido molhado é igual a de bulbo úmido, ou seja, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água. Este período caracteriza-se por uma transferência de calor, ou um fenômeno de evaporação, que finaliza quando atinge a umidade crítica. A partir deste momento, a temperatura da superfície aumenta a taxa de secagem que decresce rapidamente (tendendo a zero), significando que a secagem está sendo controlada pelo movimento da umidade do interior do sólido até a superfície, acarretando mecanismos com a difusão de umidade, gradientes de pressão de vapor e vaporização de umidade. Este período, denominado de período à taxa decrescente, aproxima-se do equilíbrio, ou o menor teor de umidade atingível no processo de secagem, sendo chamado de equilíbrio.

2.3.1. Período de secagem à taxa constante

Este fenômeno é observado em produtos nos quais a resistência externa para evaporar e remover o vapor de água na superfície para o meio é maior que a resistência interna à migração de umidade. Caracteriza-se pelo fato da superfície do material a ser mantido a um nível de água similar a uma área de água livre, ou seja, a secagem ocorre semelhante a água pura evaporada, portanto, é função da velocidade, temperatura e umidade do ar externo.

O ponto de inflexão do período da secagem a taxa constante e decrescente, segundo Park (1987), não representa uma propriedade e depende inclusive dos parâmetros operacionais. Portanto, este ponto não deve receber denominação de “ponto crítico”. A denominação mais correta seria “ponto de transição” do período de taxa crescente ao período de taxa decrescente ou “ponto de inflexão” de taxas. O ponto crítico na taxa de secagem estaria situado no período de taxa decrescente, representando a transição do estado pendular e funicular.

2.3.2. Período de secagem à taxa decrescente

Este período é quase sempre o único observado na secagem dos produtos agrícolas. No momento em que a quantidade de água diminui na superfície ocasiona um decréscimo da velocidade de secagem, dando início ao período de taxa decrescente.

A previsão da taxa de secagem dos produtos biológicos durante o período de taxa decrescente é mais complexo do que durante o período de taxa constante, por isso, deve-se considerar não somente os mecanismos de transferência externa, mas também os mecanismo de transferência do interior do produto como difusão de calor e massa (Martins e Cavalcante Mata, 1984). Estas observações são respaldadas por Chirife (1983), as quais foram relacionadas como: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor, em que um mecanismo não necessariamente exclui aos outros, podendo haver a ocorrência simultânea de diversos mecanismos na segunda fase deste período, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da saturação, a difusão da fase vapor é provavelmente o mecanismo

dominante. No entanto, para uma análise da secagem mediante a obtenção das curvas de secagem, considera-se a umidade adimensional (X/X_0) em função do tempo; a taxa de secagem (N) em função da umidade absoluta (X) e o adimensional de água livre, ($X-X_c/X_0-X_c$) em função do tempo.

De acordo com Daudin (1983), a teoria de migração de água por difusão pode ser representado pela lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade. As análises feitas com a utilização desta lei, enfocam principalmente o estudo dos efeitos globais do fenômeno interno e, conseqüentemente, não descrevem os possíveis mecanismos de migração. Este processo é descrito no período de secagem decrescente, por modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Esses modelos são geralmente de transferência de massa, desprezando-se o efeito de transferência de calor. Segundo Fortes e Okos (Murr, 1992) o método empírico é utilizado para análise de secagem usando dados experimentais que podem ser determinados em laboratório e na utilização da análise adimensional. Tal método geralmente se baseia nas condições externas de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior do produto, muito embora forneça informações práticas para elaboração de projetos. Assim, Park (1990) sugeriu a correção de dados experimentais de secagem de materiais biológicos utilizando o conceito dos dimensionais de Luikov e Mikhailov.

2.3.3. Avaliação de cinética de secagem de frutas

Vagenas et al. (1990) ao estudarem a secagem de alimentos verificaram que dentre as dificuldades ou problemas encontrado durante a secagem, tem-se a complexidade da composição e estrutura do alimento.

No estudo da secagem para diversas variedades de uva, Vazquez et al. (1997) atribuíram o aumento da taxa de secagem a difusão de água através da casca da uva, que é bastante favorecida com temperaturas elevadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Simal et al. (1996).

Moura (2001) não observou para o caju um período bem definido de secagem à taxa constante, ocorre somente período decrescente, isto demonstra que a difusão é provavelmente o processo físico que governa o movimento de umidade desta fruta. A ausência do período de secagem à taxa constante pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois, mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura. A ausência do período à taxa constante, também foi observada por Vergara et al. (1997) estudando a secagem de maçãs, por Gabas (1998) para uva, e por Gouveia (1999) para gengibre.

Prado (1998) secando tâmaras observou que a temperatura é o principal fator que domina o processo de secagem e que este praticamente não é afetado pela velocidade do ar. Esses resultados também foram observados por McMinn e Magee (1996), Gabas (1998), Gouveia (1999) e Moura (2001) secando batatas, uva, gengibre e caju, respectivamente.

Moura (2001) verificou que quanto maior a temperatura, maior é a taxa de secagem, e mais rapidamente esta se processa e que o tempo gasto para secar o caju a temperaturas mais baixas é o dobro do tempo despendido pela temperatura mais elevada.

Krohida et al. (2000) estudando os efeitos de vários fatores no processo de secagem de maçãs, verificou que a cinética de secagem foi fortemente afetada pelo tamanho das amostras e pela temperatura do ar de secagem. Estes resultados encontram-se respaldados em Kironoudis et al. (1997) secando maçãs, pêras, kiwi e bananas.

Em resumo, pode-se afirmar que a secagem de frutas de uma maneira geral considera a temperatura do ar de secagem como o parâmetro de maior influencia na cinética e na qualidade do produto final.

2.3.4. Secadores de leito fixo

Os secadores de leito fixo são secadores caracterizados por apresentar baixo custo e possuir fácil operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem

e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Estes secadores possuem configuração bastante simples, implantação a baixo custo e versatilidade, uma vez que podem ser utilizados para a secagem de diversos produtos agrícolas. É constituído de uma câmara de secagem, a qual é insuflada por um ventilador. Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto, formando uma região denominada zona de secagem, onde ocorre a troca de umidade entre o produto e o ar de secagem. Forma-se também um gradiente de umidade, que não pode ser elevado, para não comprometer a qualidade do produto (Lima, 1992; Nucci, 1995).

Os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada da amostra e a temperatura do ar de secagem. O gradiente será tanto mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto. Esses fatores também influenciam o consumo de energia e o tempo de secagem do produto (Lacerda Filho, 1986).

2.4. Calor isostérico de sorção

O calor isostérico de sorção (Q_{st}) é um parâmetro termodinâmico geralmente obtido a partir de dados de sorção, e representa a diferença entre entalpia da água na fase de vapor e a entalpia parcial da água líquida adsorvida no sólido, à uma dada concentração, ou seja, representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida. Seu valor é freqüentemente calculado através da equação de Clausius-Clapeyron.

Sopade e Ajisehiri (1994) utilizaram uma equação exponencial para descrever a relação entre o calor de sorção e o teor de umidade, tanto para adsorção, como para dessorção.

O conhecimento da dependência do calor de sorção em função do conteúdo de umidade é importante nos estudos sobre armazenagem e secagem, uma vez que estima as necessidades energética do processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da

água no produto (Tolaba e Suarez, 1995). A equação triparamétrica descrita a seguir prediz o excesso de calor de sorção em função da umidade do produto.

$$Q_{st} = R k_1 k_2 \frac{X}{k_3} \quad (8)$$

em que:

Q_{st} = calor isostérico de sorção;

X = conteúdo de água em base seca;

R = constante universal dos gases;

k_1 , k_2 e k_3 = constantes que dependem do produto.

Dural e Hines (1993) descreveram como outro motivo importante para o cálculo do calor isostérico de sorção, a caracterização da natureza da superfície adsorvente.

Zhang et al. (1996) estudaram isotermas de sorção da umidade de alguns vegetais nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, e observaram que calor isostérico de sorção pode ser usado para estimar a energia requerida no processo de desidratação de produtos agrícolas.

2.5. Planejamento e otimização de experimento

É importante o estudo das variáveis de um processo, as quais podem ser obtidos mediante um método de planejamento experimental capaz de ser executado ordenadamente com um número de ensaios reduzidos ao mínimo necessário, e que permita a verificação dos efeitos individuais e das interações de todas as variáveis sobre a resposta, assim como definição das variáveis mais importantes para o processo, avaliação dos erros experimentais e de regressão, modelagem empírica dos resultados em função das variáveis escolhidas (Silva, 1998).

2.5.1. Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta é uma técnica de otimização baseada no uso de planejamentos fatoriais, introduzida na década de 1950. Ela é constituída de duas etapas distintas: modelagem e deslocamento. Com a finalidade de eleger uma região ótima (máxima ou mínima) da superfície investigada, modelando-se e deslocando-se tantas vezes quantas forem necessárias. A modelagem normalmente é feita, ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamento fatoriais. O deslocamento é feito sempre ao longo do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é a trajetória na qual a resposta varia de forma mais pronunciada (Barros Neto et al., 1995).

O método do planejamento experimental consiste em selecionar um número fixo de níveis para cada uma das variáveis de entrada e então executar experimentos com todas possíveis combinações. Como se deseja reduzir o número de ensaios ao mínimo possível emprega-se um planejamento fatorial com dois níveis (+1 e -1) para cada variável. Se n fatores (variáveis controladas pelo experimentador) estão envolvidas no estudo de um sistema, o planejamento necessita de 2^n ensaios diferentes, que é o número mínimo para obtenção de um planejamento fatorial completo.

Khuri e Cornell (1987) estudaram o chamado Planejamento Composto Central, também denominado de configuração "estrela". Este planejamento consiste de um planejamento fatorial completo 2^k , com replicatas no ponto central e dois pontos sobre o eixo de cada variável a uma distância $\pm \alpha$.

Para verificação dos modelos empíricos através de regressão de primeira ou segunda ordem, Box et al. (1978) afirmam que se faz necessário uma análise estatística, com dois parâmetros muito importantes: o coeficiente de correção da regressão e o valor estimado para o teste F.

O coeficiente de correlação (R^2) é um parâmetro estatístico que relaciona a variância da própria população de pontos experimentais. Se a correlação entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais for igual a unidade, diz-se que esta é perfeita, quanto mais próximo este valor estiver da unidade, melhor será o ajuste do modelo com os pontos experimentais. O fundamento do teste F consiste em verificar se existe relação entre as variáveis e a resposta. Segundo Barros Neto et al. (1995) quando não há relação entre a resposta e a variável, pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas da regressão e dos resíduos (MQR/MQr) segue uma distribuição de hipótese nula (F). Neste caso, a variação nos valores dos resultados é devido exclusivamente a fatores aleatórios. A hipótese que pode ser testado usando o valor efetivamente calculado mediante a relação MQR/MQr, bastando compará-la com o valor tabelado no nível de confiança desejado. Se as variações nas respostas experimentais apresentarem alta probabilidade de pertencerem a essa distribuição, não há motivo para se questionar a hipótese nula.

Se a razão MQR/MQr for maior que o F tabelado, pode-se dizer que a equação é estatisticamente significativa e os dados experimentais são representados pelo modelo proposto. Pode acontecer porém, que uma regressão embora significativa do ponto de vista do teste F, não seja útil para realizar previsões por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Tanto Box e Wetz (1973), como Barros Neto et al. (1995), sugerem para que se optem por uma regressão para fins preditivos quando estas apresentar o valor da razão MQR/MQr, no mínimo, 4 a 5 vezes o valor de F tabelado.

A utilização da ferramenta de planejamento experimental tem objetivo de otimizar o processo de secagem para obtenção de produtos com a máxima perda de água em um menor tempo possível, buscando resultados que alcance uma alta eficiência com custos operacionais baixos.

Gouveia (1999b) mediante planejamento experimental, secou gengibre a temperaturas de 29, 35, 50, 65 e 71°C e velocidade do ar de secagem variando entre 0,8 a 2,2 m.s⁻¹, observou que há uma tendência da maximização da redução do conteúdo de

umidade na faixa mais elevada da temperatura, independente da velocidade do ar de secagem utilizada, tendo em vista que a altas temperaturas e baixas velocidade do ar obteve-se resultados satisfatórios, alcançando uma alta eficiência. Resultados semelhantes foram obtidos por McMinn e Magee (1996), no estudo dos efeitos da velocidade e da temperatura do ar na taxa de secagem onde verificaram ser a temperatura o principal fator controlador do processo; Moura (2001) secando caju a temperaturas e velocidade variando entre 35 a 65°C e 0,9 a 1,9 m.s⁻¹ verificou que as faixas de velocidade do ar estudadas não apresentaram efeitos significativos no processamento desta fruta.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola em conjunto com o Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química, ambos pertencentes ao Centro de Ciências e Tecnologia, CCT, da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande, PB.

3.1. Matéria-prima

Foram utilizados goiaba (*Psidium guajava L.*) adquiridas em supermercado em Campina Grande, oriunda da central da hortifrutícola (CEHORT) localizada em Recife, PE. Para o levantamento das isotermas e o cálculo do conteúdo de umidade, as amostras foram obtidas triturando-as em um processador elétrico de alimentos da Marca Walitta, preparando-as em seguida para o estudo.

3.2. Método

3.2.1. Determinação do conteúdo de umidade

Para determinação do conteúdo de umidade da goiaba foi utilizado o método descrito pela AOAC (1984). As amostras, em triplicatas, postas em cadinhos, foram levadas a estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 100°C por três horas. Todas as medidas de massa foram feitas em balança analítica de precisão de 0,001g.

3.2.2. Equilíbrio higroscópico

Os teores de umidade de equilíbrio das goiabas foram determinadas por meio do método estático, utilizando-se soluções de sais saturados em água destilada para uma faixa de umidade relativa variando de 10,75 a 82,32% (Tabela 1). Os testes foram conduzidos às temperaturas de 40, 45, 55, 65 e 70°C. Para tanto foram utilizadas estufas de circulação forçada de ar, visando manter as amostras na temperatura e umidade desejada. Regularmente as temperaturas foram observadas com auxílio de termômetros colocados no interior de cada estufa.

Tabela 1. Valores das umidades relativas obtidas com as soluções salinas nas cinco temperaturas estudadas

SAIS	Umidade Relativa (%)				
	40°C	45°C	55°C	65°C	70°C
LiCl	11,21	11,16	11,03	10,86	10,75
MgCl ₂	31,60	31,10	29,93	28,54	27,77
K ₂ CO ₃	43,30	43,00	42,58	41,84	41,58
NaBr	53,17	51,95	50,15	49,49	49,70
KI	66,09	65,26	63,78	62,50	61,93
NaCl	74,87	74,52	74,41	74,71	75,00
KCl	82,32	79,56	80,70	79,85	79,49

FONTE: Greenspan (1977)

As amostras com quantidades conhecidas foram colocadas em triplicatas em cadinhos de papel alumínio e estes colocados em potes herméticos com soluções de sais inorgânicos saturados de modo a obter valores de umidade relativa desejada. Para cada temperatura foram utilizadas sete soluções diferentes de sais. Os cadinhos foram pesados periodicamente até que a massa se tornasse constante. Depois de alcançado o equilíbrio, as amostras foram levadas a estufa à uma temperatura de 100°C por um período três horas, determinando-se a massa seca. Dispondo-se desta, calculou-se a umidade de equilíbrio em base seca (b.s).

As umidades de equilíbrio foram calculadas da seguinte forma:

$$X_e = \frac{m_e - m_s}{m_s} \quad (9)$$

em que:

X_e = umidade de equilíbrio em base seca;

m_e = massa da amostra quando atingido o equilíbrio;

m_s = massa seca da amostra.

3.2.3. Ajuste dos modelos

As equações utilizadas neste trabalho para descrever o comportamento das curvas de desorção de umidade de goiaba foram: BET (Equação 10), GAB (Equação 11) Halsey (Equação 12), Oswin (Equação 13) e Smith (Equação 14).

BET:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{BET} a_w}{1 - a_w} \left\{ \frac{1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1}}{1 - (1 - C_{BET})a_w - C_{BET} a_w^{n+1}} \right\} \quad (10)$$

em que:

a_w = atividade de água;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

n = número de camadas moleculares;

C_{BET} = constante de BET.

GAB:

$$\frac{X_c}{X_m} = \frac{C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)} \quad (11)$$

em que:

a_w = atividade de água;

X_e = conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca;

X_m = conteúdo de umidade na monocamada molecular;

C_{GAB} e K_{GAB} = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

Halsey:

$$a_w = \exp\left(\frac{-a''}{X_c^b}\right) \quad (12)$$

em que:

a_w = atividade de água;

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca;

a'' e b = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

Oswin:

$$X_c = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b \quad (13)$$

em que:

a_w = atividade de água;

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca;

a e b = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

Smith:

$$X_e = ((a - b)(-c) \ln(1 - \varphi)) \quad (14)$$

em que:

X_e = umidade de equilíbrio expressa em base seca;

φ = umidade relativa em decimal;

a, b e c = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

Com a finalidade de determinar os coeficientes das equações citadas, mediante análise de regressão não linear, utilizou-se o programa computacional STATISTICA versão 5.0. Os dados experimentais foram comparados com os valores calculados pelos modelos analisando-se o desvio médio relativo (P) para cada modelo, conforme descrito por Chen e Morey (Corrêa e Almeida, 1999).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|(M_i - Mp_i)|}{M_i} \quad (15)$$

em que:

M_i = valores obtidos experimentalmente;

Mp_i = valores preditos pelo modelo;

n = número de dados experimentais.

Com base nesta equação, tem-se que os melhores ajustes para as equações do estudo, são dados para as equações com maior R^2 e menor P.

3.2.4. Calor isostérico de sorção

A partir das isotermas de dessorção da goiaba ajustada pela equação de GAB, determinou-se o excesso de calor isostérico de sorção (Q_{st}) mediante uma regressão linear dos dados do logaritmo neperiano da atividade de água com o inverso da temperatura a diferentes umidades e aplicou-se a equação de Clausius-Clapeyron expressa da seguinte forma:

$$Q_{st} = -R \left[\frac{d \ln a_w}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right] \quad (16)$$

em que:

Q_{st} = calor isostérico, Kj.Kg^{-1} ;

a_w = atividade de água;

R = constante dos gases, $0,4618\text{Kj.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

T = temperatura absoluta, K.

Deste modo determinou-se os valores do calor isostérico de sorção, os quais correspondem ao coeficiente angular de cada reta multiplicada pela constante universal dos gases. Os dados de calor isostérico de sorção e umidade de equilíbrio foram ajustadas de acordo a equação de Sopade-Ajisegiri (1994) com o auxílio do Software Origin versão 5.0.

$$Q_{st} = A \exp(B X) \quad (17)$$

em que:

X = teor de umidade em base seca;

Q_{st} = calor isostérico Kj.Kg^{-1} ;

A e B = constantes que dependem do produto.

3.2.5. Planejamento fatorial

A temperatura e a velocidade do ar de secagem que dependem do tempo, foram definidas como as variáveis nos dois níveis (-1 e +1), estudadas no processo de secagem para cada variável de entrada. Os valores reais correspondentes a estes níveis foram definidos com base na literatura (Barros Neto et al., 1995).

As temperaturas foram fixadas em 80, 90, 100°C e velocidade em 1,0, 1,5, e 2,0 m.s⁻¹, variando-se o tempo conforme o decorrer da secagem, em intervalos regulares. Na Tabela 2 encontram-se os valores reais e codificados para o planejamento fatorial.

Tabela 2. Valores reais e os níveis dos fatores do planejamento fatorial completo (2²) estudado

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
Temperatura (°C)	80	90	100
Velocidade do ar (m.s ⁻¹)	1,0	1,5	2,0

Este planejamento fatorial inicial foi ampliado para um planejamento fatorial 2²⁺ "configuração estrela", com deslocamento axial (níveis - α , -1, 0, +1, + α) para ajuste dos modelos quadráticos. O cálculo foi feito usando a equação determinada por Box e Wilson (1951).

$$\alpha = \left[2^k \right]^{1/4} \quad (18)$$

em que:

K = número de variáveis independentes ($K=2$), logo:

$$\alpha = 1,4142.$$

A Tabela 3 contém os valores reais e codificados para todos os níveis dos fatores experimental; e na Tabela 4, a matriz do planejamento de experimentos. As superfícies de respostas foram formuladas a partir da escolha dos melhores modelos.

Tabela 3. Valores reais e os níveis dos fatores do planejamento fatorial completo ($2^2 +$ "configuração estrela")

Variáveis	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
Temperatura (° C)	76	80	90	100	104
Velocidade do ar (m.s ⁻¹)	0,8	1,0	1,5	2,0	2,2

Tabela 4. Matriz do planejamento dos experimentos em sua forma codificada e real

Ensaio	Temperatura		Velocidade do ar	
	Codificada	Real (° C)	Codificada	Real (m.s ⁻¹)
01	-1	80	-1	1,0
02	+1	100	-1	1,0
03	-1	80	+1	2,0
04	+1	100	+1	2,0
05	0	90	0	1,5
06	0	90	0	1,5
07	0	90	0	1,5
08	-1,4142	76	0	1,5
09	0	90	+1,4142	2,2
10	+1,4142	104	0	1,5
11	0	90	-1,4142	0,8

A avaliação da qualidade do ajuste dos modelos empíricos obtidos através de regressão empregados aos dados experimentais, foi feito com base nas recomendações de Barros Neto et al. (1995), conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Forma empregada na apresentação estatística dos dados que validam os equações testadas

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	SQ_R	MQ_R	$L - 1$	MQ_R/MQ_r
Resíduos	SQ_r	MQ_r	$N - L$	-
Falta de ajuste	SQ_{faj}	MQ_{faj}	$M - L$	-
Erro puro	SQ_{ep}	MQ_{ep}	$N - M$	-
Total	SQ_T	-	$N - 1$	-
Coefficiente de determinação	$R^2 = SQ_R/SQ_T$	-	-	-
F Tabelado	-	-	-	$F_{confiança,L-1,N-L}$

em que:

SQ_R = soma quadrática devida à regressão (modelo ajustado);

MQ_R = média quadrática devida à regressão;

SQ_r = soma quadrática residual (desvio);

MQ_r = média quadrática residual;

SQ_{faj} = soma quadrática devida à falta de ajuste;

MQ_{faj} = média quadrática devida à falta de ajuste;

SQ_{ep} = soma quadrática devida ao erro puro;

MQ_{ep} = média quadrática devida ao erro puro;

SQ_T = soma quadrática em torno da média.

3.2.6. Curvas de secagem

A secagem da goiaba foi realizada em um secador de leito fixo existente no Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química/CCT/UFPB, Campus II, Campina Grande, PB.

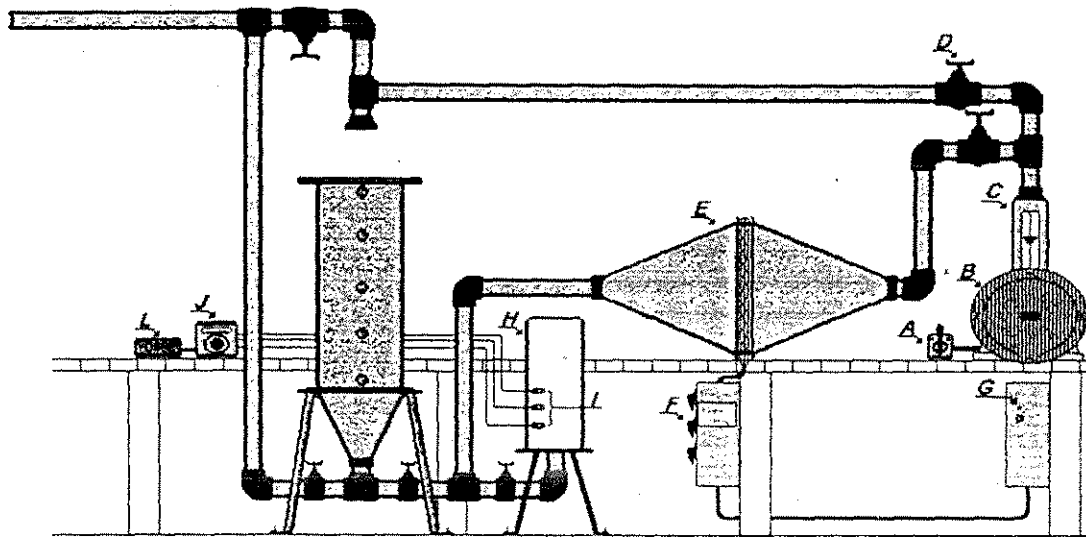


Figura 1. Secador de leito fixo: A – chave do compressor; B – compressor radial; C – medidor de vazão; D – válvula reguladora; E – aquecedor elétrico; F – chave das resistências; G – chave do sistema de controle; H – câmara de secagem; I – termopares; J – controlador de temperatura; L – milivoltímetro digital.

A câmara de secagem é formada por uma coluna cilíndrica de 17,8 cm de diâmetro e 60,0 cm de altura. Possui uma seção inferior que funciona como distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro para permitir que o escoamento do ar seja uniforme em todo o leito. A coluna é isolada com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais e no fundo, existem termopares para medição da temperatura do ar de secagem e para o controlador de temperatura, respectivamente.

Antes do início de cada ensaio, os equipamentos foram colocados em funcionamento nas condições de secagem desejadas. A vazão do ar de secagem foi controlada por válvulas de forma a manter constante o fluxo de ar a uma determinada velocidade, a qual foi medida por um anemômetro de hélice. O ar foi aquecido por um conjunto de resistências elétricas, que foram ligadas através de uma chave do sistema de controle. As temperaturas de secagem foram ajustadas através do controlador de temperatura que emitia para o milivoltímetro a leitura referente a cada temperatura desejada.

Foram utilizadas triplicatas de cada amostra. Estas foram cortadas em fatias transversais com espessura de 0,5 cm. Antes de ingressar no secador foram distribuídas uniformemente em cesta previamente tarada, então o conjunto (cesta + amostra) foi pesado e colocado dentro do secador previamente estabilizado a temperatura desejada. A umidade perdida durante a secagem foi obtida por pesagens descontinuas das amostras e seguiu-se um esquema de secagem em intervalos de 5, 10, 30, 60 até o final do processo de secagem. As pesagens foram conduzidas até que a variação de massa se tornassem insignificante. Após este procedimento as amostras foram levadas a estufa à temperatura de 105°C por três horas, para determinação da massa seca.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Isotermas de sorção

Os resultados experimentais de umidade de equilíbrio da goiaba com suas respectivas atividade de água a diferentes temperaturas encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6. Valores experimentais de umidade de equilíbrio (U_{eq}) para dessorção de água em goiaba e atividade de água (a_w) numa faixa de 0,31 a 0,82 e temperaturas de 40 a 70°C

40°C		45°C		55°C		65°C		70°C	
a_w	U_{eq}	a_w	U_{eq}	a_w	U_{eq}	a_w	U_{eq}	a_w	U_{eq}
-	-	0,31	0,05	0,30	0,08	0,28	0,06	-	-
0,43	0,10	-	-	0,43	0,11	0,42	0,10	0,42	0,08
0,53	0,10	0,51	0,10	-	-	0,50	0,11	0,50	0,10
0,70	0,14	0,65	0,17	0,64	0,17	0,63	0,15	0,62	0,13
0,75	0,20	0,74	0,22	0,74	0,25	0,75	0,25	0,75	0,20
0,82	0,26	0,79	0,27	0,80	0,27	0,80	0,28	0,80	0,22

Através dos valores contidos na Tabela 6, verifica-se que a atividade de equilíbrio é maior para um valor maior de atividade de água e que há uma tendência de estabilidade da umidade de equilíbrio para a mesma atividade de água nas temperaturas de 45 e 55°C. No entanto, para toda faixa de temperatura estudada observa-se flutuações tanto de aumento quanto de diminuição para a mesma atividade de água. Estes resultados divergem em parte dos obtidos por Corrêa e Almeida. (1999) e Kechaou e Maalej (1999), onde os autores concluíram para sementes de algodão herbáceo e banana, respectivamente, que a umidade

de equilíbrio aumenta com o aumento da atividade de água e que esta diminui com o aumento da temperatura.

Na Tabela 7 se encontram os dados dos parâmetros estimados, obtidos por regressão não linear para as equações estudadas de GAB, BET, Oswin, Smith e Halsey, na modelagem das isotermas de dessorção da goiaba em cada um das temperaturas trabalhadas, bem como os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios médios relativos (P).

Tabela 7. Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção da goiaba para as temperaturas nas faixas de 40 a 70°C

Modelo		40°C	45°C	55°C	65°C	70°C
GAB	x_m	0,057	1,845	0,121	0,0938	0,085
	C	53817	0,072	3,23	2,442	2,281
	k	0,961	0,649	0,781	0,900	0,860
	R^2 (%)	99,30	99,50	99,30	99,50	99,90
	P (%)	4,41	5,39	3,96	3,02	1,48
BET	x_m	0,904	1,468	0,292	1,290	0,700
	C	0,087	0,039	0,492	0,068	0,106
	R^2 (%)	97,00	99,37	98,60	98,80	99,50
	P (%)	10,08	8,33	7,74	8,96	11,13
Oswin	a	0,108	0,093	0,132	0,113	0,095
	b	0,593	0,800	0,530	0,680	0,639
	R^2 (%)	99,02	99,23	99,10	99,40	99,80
	P (%)	4,77	5,15	3,29	2,16	1,20
Smith	a	0,150	0,173	0,164	0,177	0,141
	b	0,002	-0,015	0,013	-0,004	-0,002
	R^2 (%)	98,40	98,20	98,70	99,20	99,80
	P (%)	6,17	6,16	5,75	4,56	1,63
Halsey	a	0,031	0,063	0,033	0,053	0,035
	b	1,394	1,011	1,496	1,171	1,269
	R^2 (%)	98,30	98,10	97,30	98,80	99,30
	P (%)	4,92	5,33	3,47	2,34	2,44

Verifica-se na Tabela 7 que o conteúdo de umidade da camada monomolecular (X_m) e o parâmetro C da equação de GAB apresentou flutuações aleatórias dentro da faixa de temperatura estudada. Estes resultados divergem dos obtidos por Gabas (1998) secando uva e Moura (2001) secando caju, os quais concluíram que os valores dos parâmetros X_m e C do modelo de GAB diminuem com o aumento da temperatura. Provavelmente esta divergência entre os valores destes parâmetros seja proveniente das diferenças de estabilidade tanto físicas como químicas destes produtos desidratados.

Em análise aos dados contidos na Tabela 7, revelado pelo coeficiente de determinação (R^2) e o desvio médio relativo (P), tem-se que com exceção da equação de BET para as temperaturas de 40°C e 70°C, onde o valor do desvio médio foi superior ao recomendado por Lomauro (1985), todas as equações descreveram satisfatoriamente as isotermas de dessorção da goiaba uma vez que os coeficientes de determinação ficaram acima de 97%, com desvio médio inferior a 8,96%. No entanto, as equações de GAB e Oswin devem ser escolhidas para representar a dessorção desse produto por terem sido as que melhores ajustaram aos dados experimentais para todas as temperaturas estudadas. Tendo o coeficiente de determinação e o desvio médio da equação de GAB sido de 99,9% e 1,48%, quando a temperatura foi de 70°C. Para as demais temperaturas estudadas, o coeficiente de determinação foi igual ou menor a 99,3% e o desvio médio igual ou menor a 5,39%. Comportamento semelhante ao constatado para o modelo de GAB, observa-se com a equação de Oswin, onde se tem o menor coeficiente de determinação (99,8%) e o menor desvio (1,20%) para os dados trabalhados experimentalmente a temperatura de 70°C.

É importante observar que para as maiores temperaturas, as equações de GAB e Oswin, ajustaram os dados experimentais com melhor coeficiente de determinação (R^2) e desvio médio relativo (P). Este fato aliado ao primeiro, indica que as equações de GAB e Oswin predizem com maior segurança que as equações de BET, Smith e Halsey, os dados das isotermas de dessorção da goiaba para as condições de temperatura e atividade de água trabalhadas podendo ser utilizada para cálculos de umidade de equilíbrio higoscópico da polpa desta fruta. A escolha da equação de GAB encontra respaldada em pesquisas realizadas por Lomauro et al. (1985), onde verificaram que esta equação pode representar

com grande precisão isotermas em mais de 50% de frutas, vegetais e carnes, quando comparadas com equações de dois parâmetros, sendo assim amplamente utilizada por pesquisadores para descrever o comportamento de isotermas de sorção de diversos produtos agrícolas, como constatado por Gabas (1998) em estudos realizados com a uva Itália, utilizando vários modelos matemáticos para o ajuste dos dados experimentais a temperaturas na faixa de 35 a 75°C e atividade de água de 0,1 a 0,9, concluindo-se que a equação de GAB foi a que melhor ajustou as isotermas de dessorção do referido produto. O mesmo foi observado por Kechaou e Maalej (1999) ao analisarem os dados de isotermas de dessorção da banana em uma faixa de atividade de água entre 0 a 0,90 e temperaturas de 35, 50 e 70°C.

Por outro lado a equação de BET foi a de menor representatividade para prever com segurança os dados das isotermas da goiaba dentro da faixa de temperatura estudada, pois, como é observado na tabela em análise, os desvios relativos (P), variam de 11,13 a 7,74% (média de 9,25%) apesar do menor coeficiente de determinação (R^2) ter sido de 97%, a média do desvio (P) ficou ao redor do limite máximo permitido.

O efeito da temperatura nas isotermas da goiaba (Figura 2), evidencia que a taxa de dessorção é mais alta no início do processo; diminuindo continuamente a medida que se aproxima da umidade de equilíbrio. Comportamento que conduz a afirmativa de aumento da taxa de dessorção com a diminuição da umidade relativa. O aumento da temperatura resulta em aumento da atividade de água para o mesmo conteúdo de umidade de equilíbrio, ou seja, os valores mais altos da taxa de dessorção da goiaba foram encontrados para temperatura de 70°C. O fato pode ser explicado, devido a dissolução dos açúcares da fruta, que aumenta significativamente quando a temperatura aumenta. Gabas (1998) e Adam et al. (2000) obtiveram resultado relativamente parecidos nos estudos das isotermas de uva Itália e cebola, respectivamente.

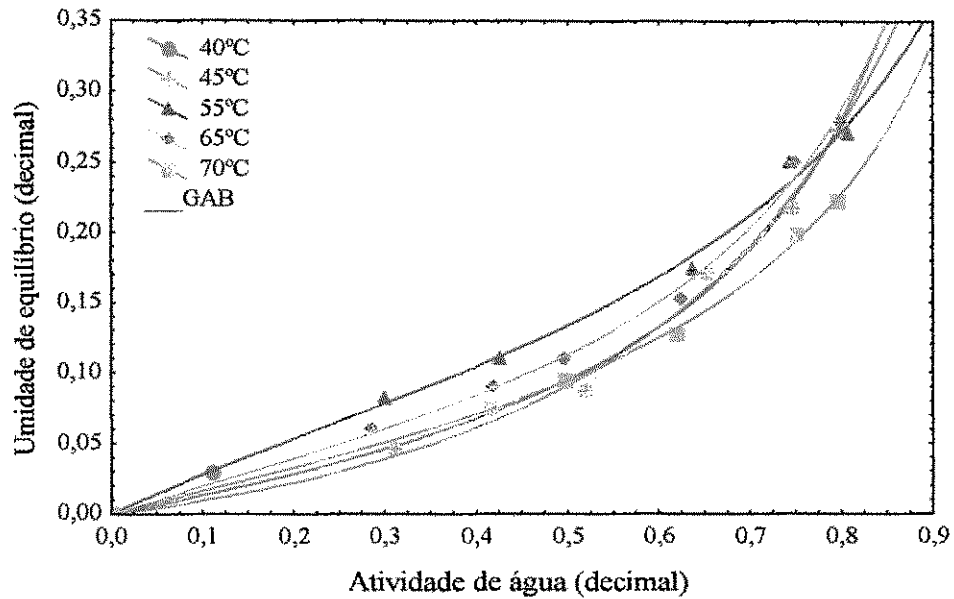


Figura 2. Isotermas de dessorção da goiaba para cinco temperaturas, ajustadas pelo modelo de GAB

4.2. Cinética de secagem

Estudou-se a cinética de secagem da goiaba em camada fina, analisando-se a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem. As tabelas contendo os dados experimentais das curvas da cinética de secagem, que é apresentada na forma adimensional do conteúdo de umidade, $(X-X_e)/(X-X_e)$ em função do tempo, encontra-se no Apêndice, Tabela A1 e em forma de gráfico, na Figura 3.

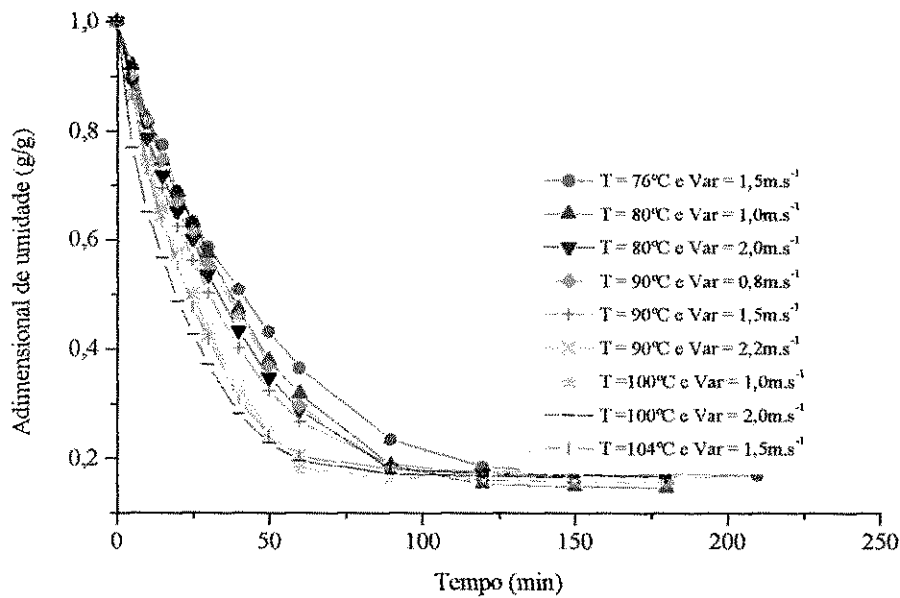


Figura 3. Cinética de secagem da goiaba para cinco temperaturas e cinco velocidades do ar de secagem

Em análise a Figura 3, tem-se que a remoção de toda água contida na goiaba ocorre no período de secagem à taxa decrescente, mostrando que a difusão é provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento da umidade através da estrutura da amostra. Isto é, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido. A ausência do período de secagem à taxa constante pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois, mesmo havendo umidade superficial livre, a água pode estar na forma de suspensão de células e de solução (açúcares e outras moléculas), apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura. A ausência do período à taxa constante, também foi observada por Gabas (1998), estudando a secagem de uva; Vergara et al. (1997), com maçãs e Gouveia et al. (1999b) com gengibre.

Tabela 8. Modelos ajustados para cada tempo de secagem das amostras da goiaba

Tempo (min)	Modelo
5	$Adm = 0,8737 - 0,0280T - 0,0017T^2 - 0,0224V - 0,0015V^2 - 0,0171$
10	$Adm = 0,7798 - 0,0422T - 0,0098T^2 - 0,0328V - 0,0085V^2 - 0,0148$
15	$Adm = 0,6946 - 0,0552T - 0,0027T^2 - 0,0330V - 0,0067V^2 - 0,0160$
20	$Adm = 0,6232 - 0,0590T - 0,0070T^2 - 0,0320V - 0,0066V^2 - 0,0133$
25	$Adm = 0,5604 - 0,0658T - 0,0075T^2 - 0,0335V - 0,0057V^2 - 0,0115$
30	$Adm = 0,5015 - 0,0678T - 0,0041T^2 - 0,0361V - 0,0103V^2 - 0,0062$
40	$Adm = 0,4001 - 0,0731T - 0,0026T^2 - 0,0332V - 0,0080V^2 - 0,0008$
50	$Adm = 0,3227 - 0,0655T - 0,0005T^2 - 0,0266V - 0,0131V^2 - 0,0050$
60	$Adm = 0,2655 - 0,0569T - 0,0036T^2 - 0,0182V - 0,0136V^2 - 0,0109$

$$Adm = (X - X_c) / (X_0 - X_c)$$

Tabela 9. Efeitos principais da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade do goiaba, para diferentes tempos de secagem

Tempo (min)	Efeitos
5	0,0561
10	0,0844
15	0,1105
20	0,1180
25	0,1315
30	0,1356
40	0,1462
50	0,1309
60	0,1139

Em análise aos dados contidos na Tabela 9, verifica-se o efeito principal da temperatura sobre a perda do conteúdo de umidade para cada período de secagem, os quais são crescentes até o período de 40 minutos. Neste período de secagem, quando a temperatura passa de seu nível inferior -1 (80°C) para o nível superior +1 (100°C), conforme observado na Tabela 2, ocorre uma redução de 0,146 *Adm* no conteúdo de umidade do produto, este efeito negativo da mudança de nível indica um aumento da perda de umidade da goiaba. Resultados semelhantes foram observados por Gouveia (1999) e Moura (2001), na secagem de gengibre e caju, respectivamente. Esta redução de umidade do produto, ocorre devido a influência da temperatura no processo de secagem, sendo considerada o fator controlador da perda de umidade do produto.

As análises de variância (Tabelas 10 a 14) mostram os valores do coeficiente de determinação (R^2) e do teste F das regressões (nível de 95% de confiança), os quais foram utilizados como parâmetros na validação dos modelos, para os tempos de secagem de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 minutos, bem como os modelos fornecidos pelo planejamento experimental.

Todos os valores foram submetidos a análise de variância, onde o efeito da temperatura foi significativo, para construção dos modelos empíricos, o modelo de segunda ordem foi o que obteve os valores de maior significância estatística, onde é observado os maiores valores de R^2 , a relação F calculado frente ao F tabelado (nível de 95% de confiança) foi no mínimo 11 vezes maior, revelando-se amplamente satisfatório para fins preditivos, visto que, o F calculado deve ser no mínimo 4 a 5 vezes o valor de F tabelado (Box e Wetz, 1973).

A Tabela 10 da análise de variância contém os dados dos ajustes dos modelos quadráticos e linear. Os valores do F calculado pelo modelo quadrático foi de 108,7 (Tabela 10a) e 31 para o modelo linear (Tabela 10b). Estes valores quando comparados com o F tabelado 21,2 e 4,7, respectivamente indica que ambos os modelos são significativos ao nível de 95% de confiança, contudo, o modelo quadrático apresentou valores mais significativos que o modelo linear, ou seja, o F calculado foi 21,2 vezes maior que o F tabelado, por isso a preferência pelo quadrático. Outra razão pela escolha deste modelo, é o valor da soma dos quadrados dos resíduos por estar de acordo com as recomendações de Barros Neto et al. (1995) ao afirmarem que o exame dos resíduos é de fundamental importância na avaliação da qualidade de qualquer modelo, pois, o modelo que deixa resíduos consideráveis obviamente é considerado um modelo ruim para fins preditivos.

Para os demais tempos de secagem (Tabelas 11 a 14) em que os efeito da temperatura foi significativo, o F calculado frente o F tabelado variou de 11 a 20,7 para o modelo quadrático e de 4 a 12,86 no modelo linear. A falta de ajuste variou de 0,01 a 0,02 e 0,046 a 0,076 para os modelos quadrático e linear, respectivamente. Verificando-se

assim, que o modelo quadrático mostrou-se mais adequado que o modelo linear para descrever a cinética de secagem da goiaba. Resultados semelhantes foram relatados por Gouveia (1999) e Moura (2001) secando gengibre e caju, respectivamente.

Tabela 10. Resultados da análise de variância para o modelo quadrático (a) e linear (b) no tempo de 15 minutos

(a)				
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,036205	0,036205	1	108,70
<i>Resíduos</i>	0,002998	0,000333	9	
Falta de ajuste	0,001789	0,000256	7	-0,42
Erro puro	0,001210	0,000605	2	
Total	0,037415	0,003741	10	
Coefficiente de determinação	0,92			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				21,20
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,02

(b)				
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,019626	0,019626	1	31
<i>Resíduos</i>	0,003173	0,000635	5	
Falta de ajuste	0,001963	0,000654	3	1,10
Erro puro	0,00121	0,000605	2	
Total	0,020836	0,003473	6	
Coefficiente de determinação	0,85			
F Tabelado R				6,61
F cal/Ftab				4,70
F Tabelado fa				19,16
F cal/Ftab				0,06

Tabela 11. Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 5 (a) e 10 (b) minutos

(a)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,013426	0,013426	1	85,05
Resíduos	0,000789	0,000158	5	
Falta de ajuste	0,001458	0,000486	3	1,45
Erro puro	0,000669	0,000334	2	
Total	0,014215	0,002369	6	
Coefficiente de determinação	0,85			
F Tabelado R				6,61
F cal/Ftab				12,86
F Tabelado fa				19,16
F cal/Ftab				0,076

(b)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,018107	0,018107	1	26,70
Resíduos	0,003395	0,000679	5	
Falta de ajuste	0,002313	0,000771	3	1,40
Erro puro	0,001083	0,000541	2	
Total	0,019189	0,003198	6	
Coefficiente de determinação	0,82			
F Tabelado R				6,61
F cal/Ftab				4,00
F Tabelado fa				19,16
F cal/Ftab				0,073

Tabela 12. Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 20 (a) e 25 (b) minutos

(a)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,039091	0,039091	1	106
Resíduos	0,003319	0,000369	9	
Falta de ajuste	0,001996	0,000285	7	0,43
Erro puro	0,001324	0,000662	2	
Total	0,040415	0,004041	10	
Coefficiente de determinação	0,92			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				20,70
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,02

(b)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,046253	0,0463	1	96
Resíduos	0,004337	0,0005	9	
Falta de ajuste	0,001776	0,0003	7	0,20
Erro puro	0,002561	0,0013	2	
Total	0,048814	0,0049	10	
Coefficiente de determinação	0,91			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				18,75
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,01

Tabela 13. Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 30 (a) e 40 (b) minutos

(a)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,05	0,05	1	97,30
Resíduos	0,0046	0,0005	9	
Falta de ajuste	0,002	0,0003	7	0,20
Erro puro	0,0026	0,0013	2	
Total	0,0526	0,0053	10	
Coefficiente de determinação	0,91			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				19,00
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,01

(b)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,0544	0,0544	1	83,14
Resíduos	0,0059	0,0007	9	
Falta de ajuste	0,0025	0,0004	7	0,20
Erro puro	0,0034	0,0017	2	
Total	0,0578	0,0058	10	
Coefficiente de determinação	0,91			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				16,20
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,01

Tabela 14. Resultados da análise de variância para o modelo quadrático no tempo de 50 (a) e 60 (b) minutos

(a)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,0442	0,0442	1	60,63
Resíduos	0,0066	0,0007	9	
Falta de ajuste	0,0031	0,0004	7	0,25
Erro puro	0,0035	0,0017	2	
Total	0,0477	0,0048	10	
Coefficiente de determinação	0,86			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				12,00
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,012

(b)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Média da soma dos quadrados	Grau de liberdade	Teste F
Devido a regressão	0,033	0,033	1	56,90
Resíduos	0,0052	0,0006	9	
Falta de ajuste	0,0025	0,0004	7	0,26
Erro puro	0,0027	0,0014	2	
Total	0,0357	0,0036	10	
Coefficiente de determinação	0,85			
F Tabelado R				5,12
F cal/Ftab				11,00
F Tabelado fa				19,35
F cal/Ftab				0,013

Em análise as superfícies de resposta (Figuras 4 a 8), observa-se que a redução do conteúdo de umidade da goiaba, na forma adimensional, em função da temperatura, velocidade do ar e tempo de secagem, indicaram que a temperatura afeta significativamente a transferência de massa no processo de secagem, aumentando assim, a perda de umidade do produto, sendo, portanto, considerado o principal fator controlador do processo de secagem. Verifica-se que em todas as superfícies de resposta estudadas a maximização da perda de umidade ocorre nas faixas de temperaturas acima de 100°C. Nota-se que nestas faixas há uma pequena influência da velocidade no processo de secagem, quando trabalhadas nas faixas maiores que 2 m.s⁻¹, como visto anteriormente no comportamento das curvas de secagem. Para as faixa menores de temperatura, observou-se que a velocidade do ar de secagem não afetou de forma marcante o conteúdo de umidade final da goiaba. Desta forma, pode-se concluir que a otimização do processo se dá em faixas de temperaturas acima de 100°C e velocidade maiores que 2 m.s⁻¹, nas quais se obtém uma alta eficiência, mantendo-se as características do produto dentro dos limites aceitáveis.

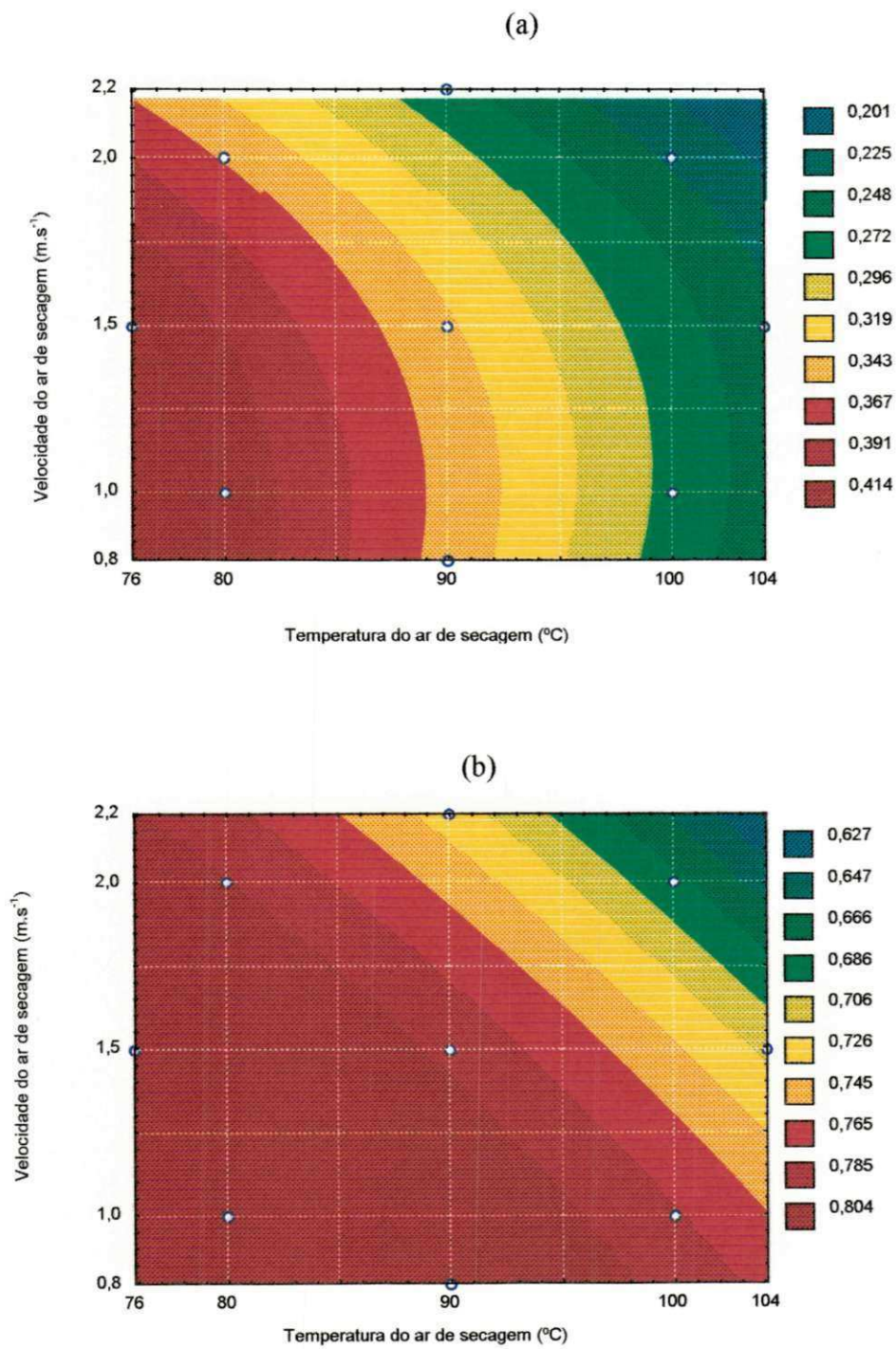


Figura 4. Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 5 (a) e 10 (b) minutos

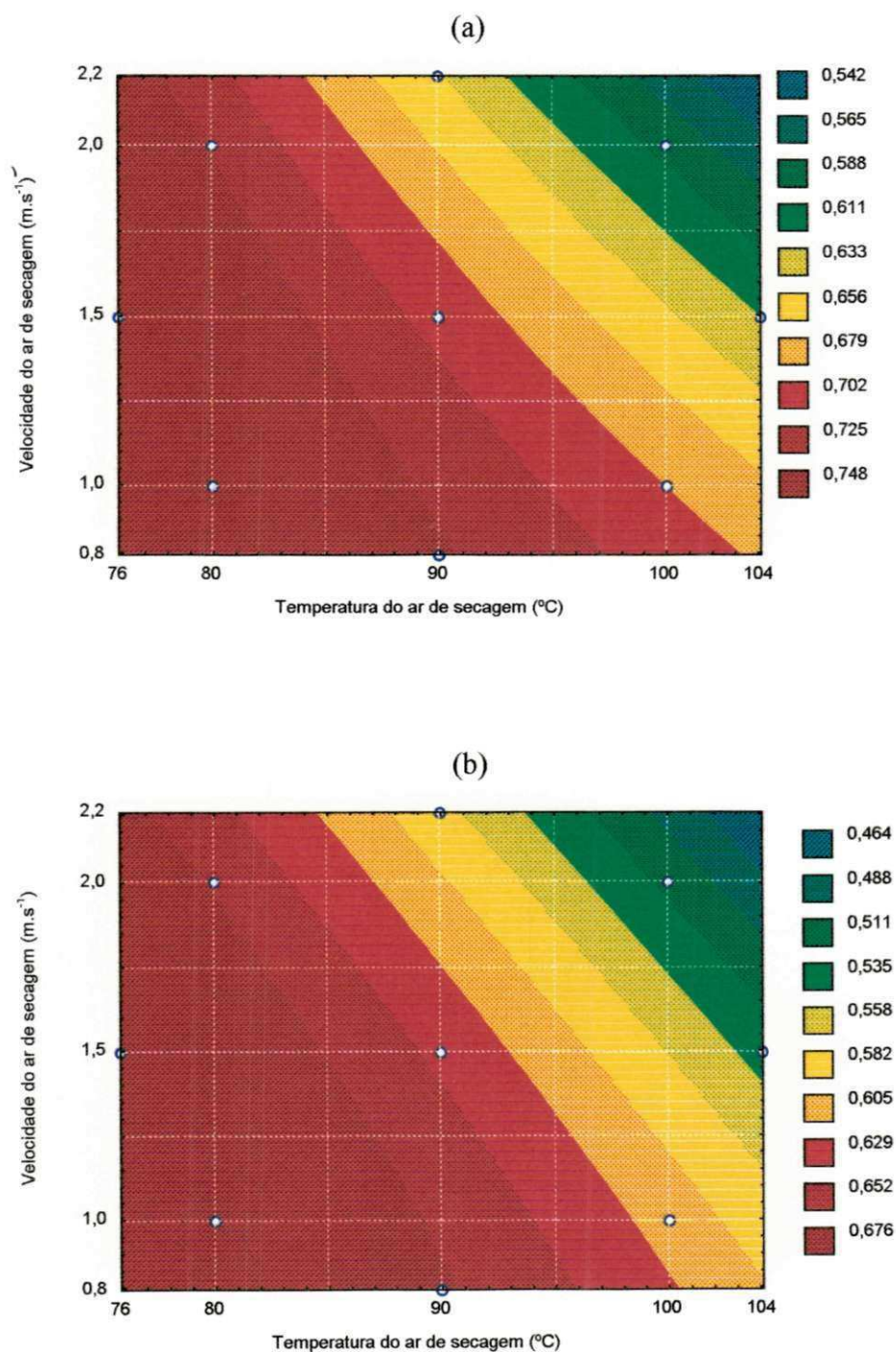


Figura 5. Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 15 (a) e 20 (b) minutos

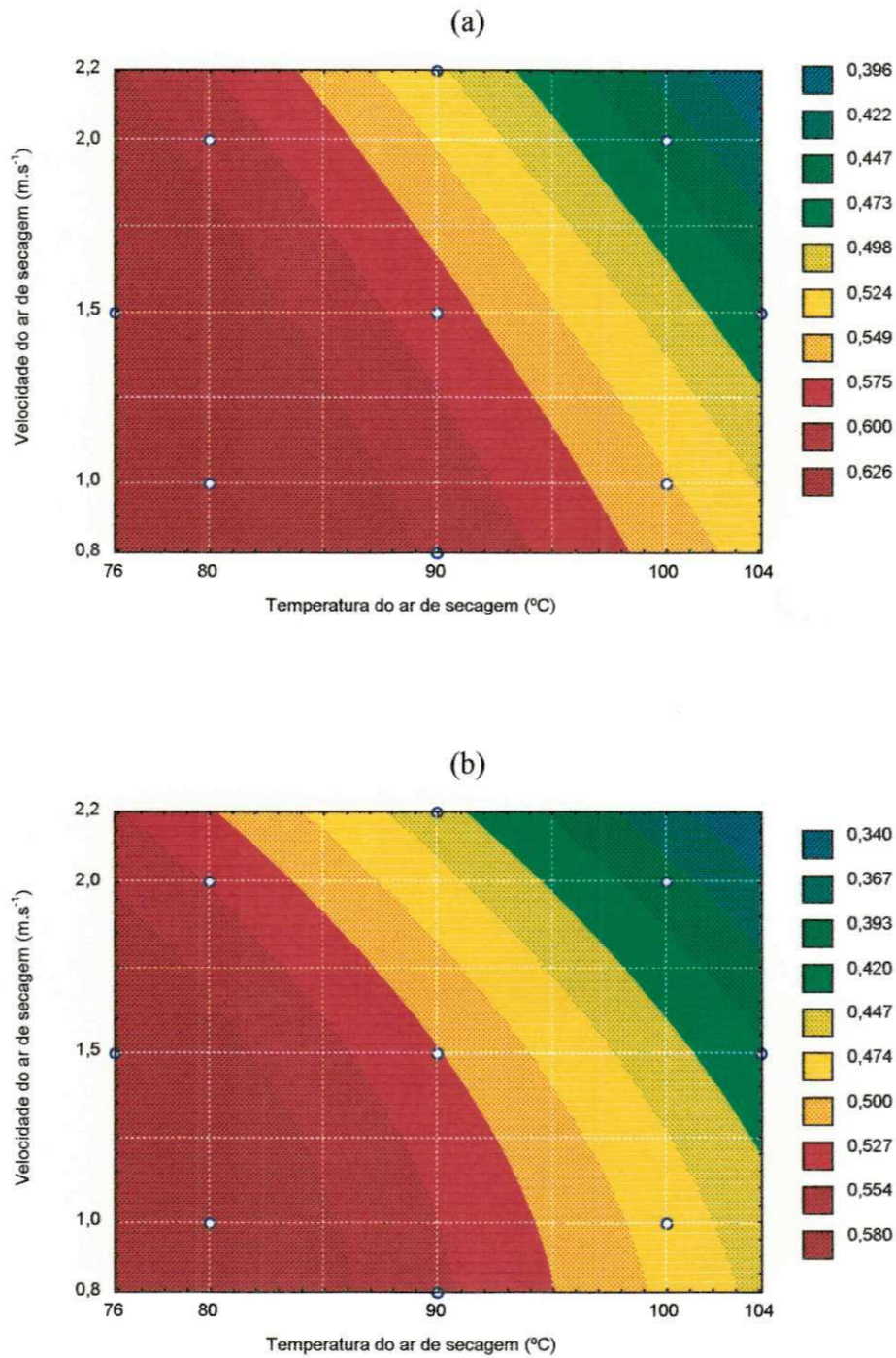


Figura 6. Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 25 (a) e 30 (b) minutos

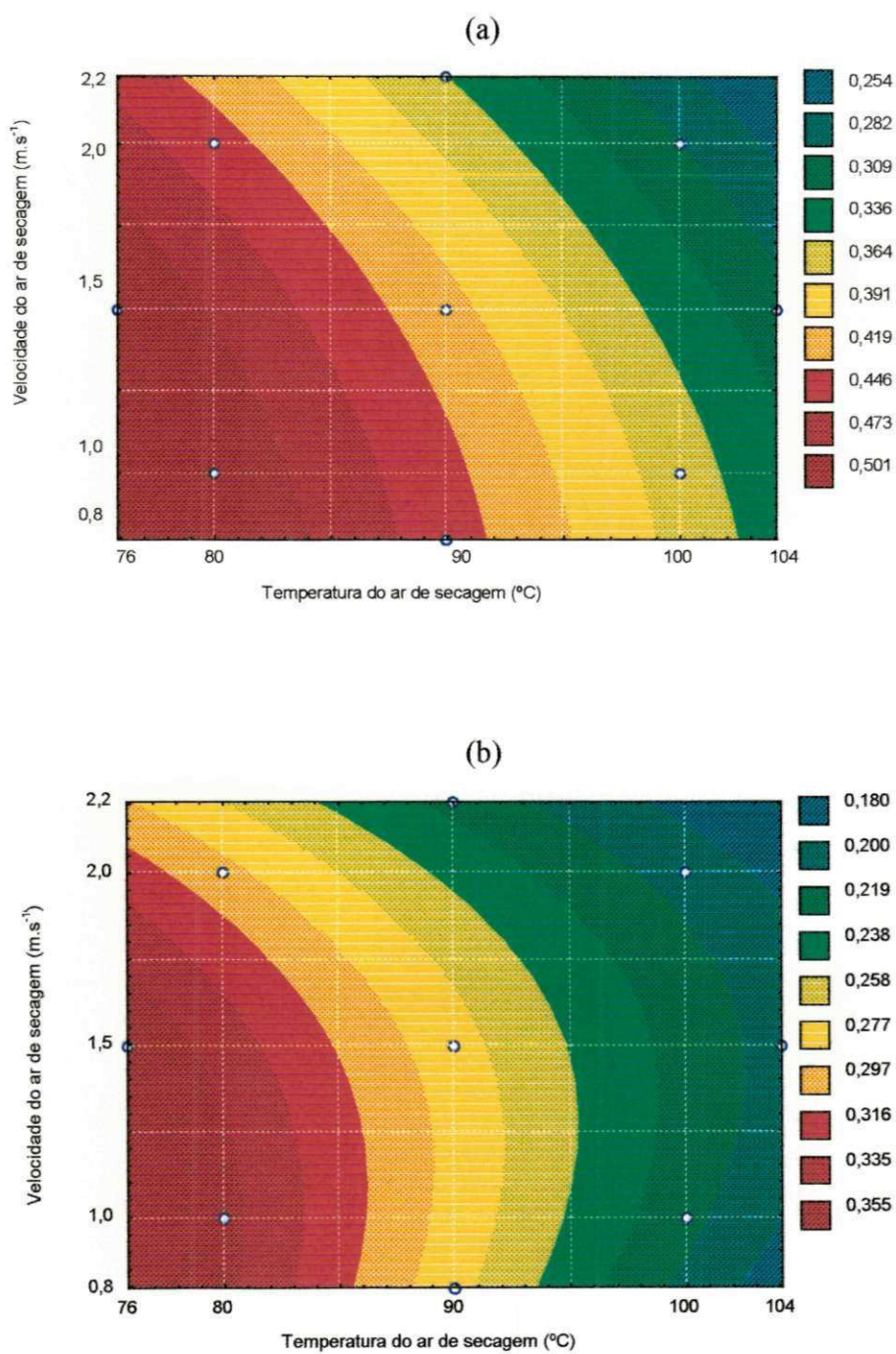


Figura 7. Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para os tempos de 40 (a) e 50 (b) minutos

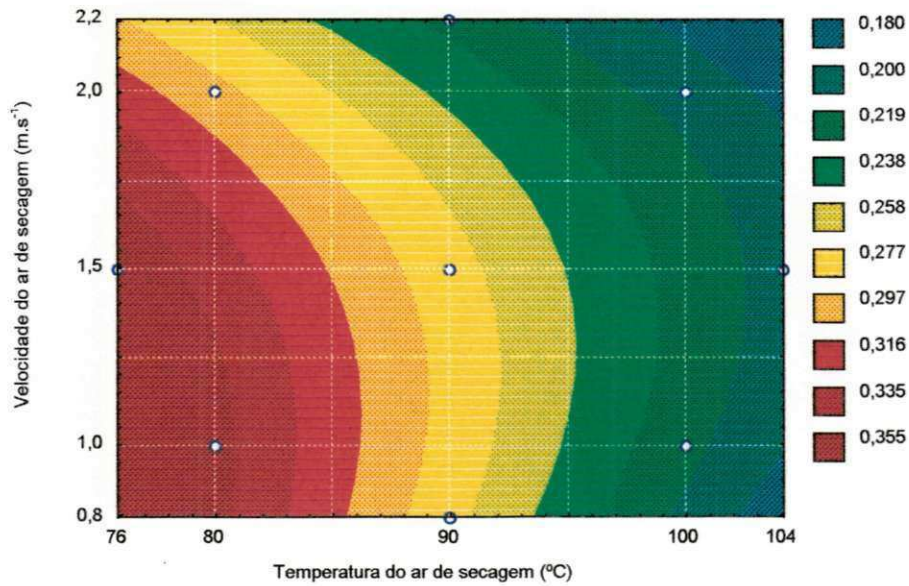


Figura 8. Superfícies de resposta do adimensional de umidade em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem, para o tempo de 60 minutos

4.4. Calor isostérico de sorção

As curvas isotérmicas de sorção foram obtidas através de regressão linear dos dados do logaritmo neperiano da atividade de água $\ln(a_w)$ com o inverso da temperatura ($1/T$) (Figura 9) em função da umidade das amostras com base nos dados das curvas de equilíbrio higroscópico ajustados através da equação de GAB. A equação utilizada foi a de Clausius-Clapeyron (Equação 16), a qual relaciona a mudança da atividade de água com a temperatura.

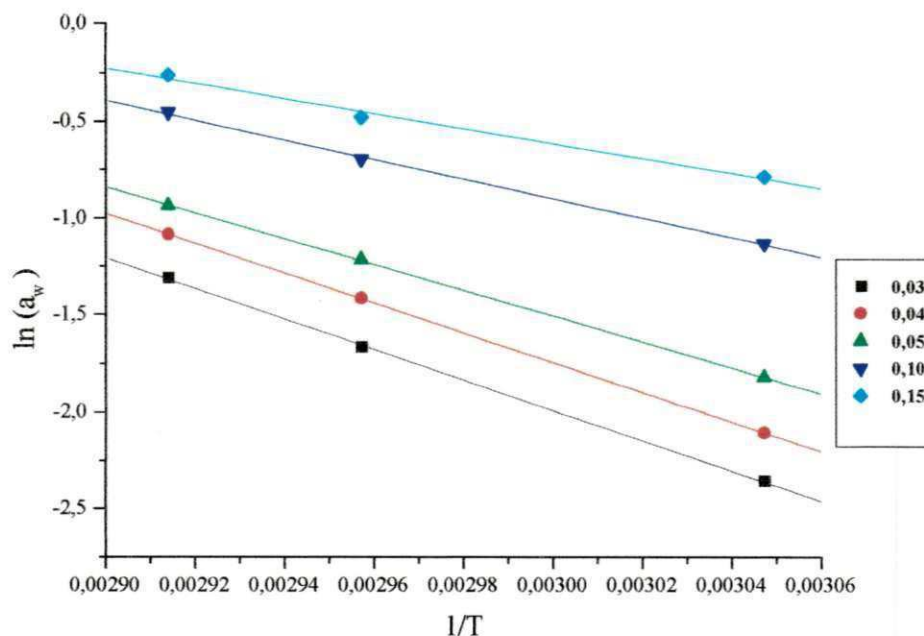


Figura 9 Linearização da equação de Clausius-Clapeyron

Os valores do calor isostérico de sorção (Tabela 15) corresponde ao coeficiente angular de cada reta multiplicada pela constante universal dos gases ($R = 0,46188 \text{Kj.Kg}^{-1}$).

Tabela 15. Valores do calor isostérico de sorção da goiaba

Umidade de equilíbrio U_{eq} (g água/g mat.seca)	Calor de sorção q_{st} (Kj.Kg ⁻¹)
0,03	3626,774
0,04	3544,051
0,05	3066,652
0,10	2313,326
0,15	1754,497

Observa-se que o calor isostérico de sorção decresce com o aumento da umidade do produto. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2000) ao estudar o calor isostérico de sorção da manga. Yoshida (1997) e Gouveia et al (1999a) estudando o calor isostérico de sorção do gengibre e milho superdoce respectivamente, observaram o mesmo

comportamento do calor de sorção, porém, o calor de sorção do gengibre e do milho superdoce diminuíram negativamente. Este comportamento pode ser explicado considerando-se que inicialmente a sorção ocorre no sítio disponível mais ativo, dando origem a alta energia de interação. Porém, ao longo do processo, a disponibilidade dos sítios de sorção decresce e o valor do calor total de sorção tende ao da água pura. Isto é supostamente devido à contribuição da dissolução endotérmica dos açúcares presentes (Gabas, 1998).

Os dados experimentais do calor isostérico de sorção da goiaba em função da umidade foram ajustados através da equação exponencial de Sopade e Ajisegiri (1994) com parâmetros A e B. Os resultados destes ajustes estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros, coeficiente de determinação e desvio médio relativo (P) do ajuste da equação de Sopade e Ajisegiri (1994), para os dados do calor isostérico de sorção (Q_s) e da umidade de equilíbrio (U_{eq}) da goiaba

A	B	R ² (%)	P(%)
4384,4	6,3	98,5	2,4

Analisando os dados contidos na Tabela 15 observa-se que a equação de Sopade e Ajisegiri (1994) descreve satisfatoriamente os valores do calor isostérico da goiaba, uma vez que o coeficiente de determinação é de 98,5% e o desvio médio de 2,4. O gráfico do calor isostérico de sorção em função da umidade encontra-se na Figura 10.

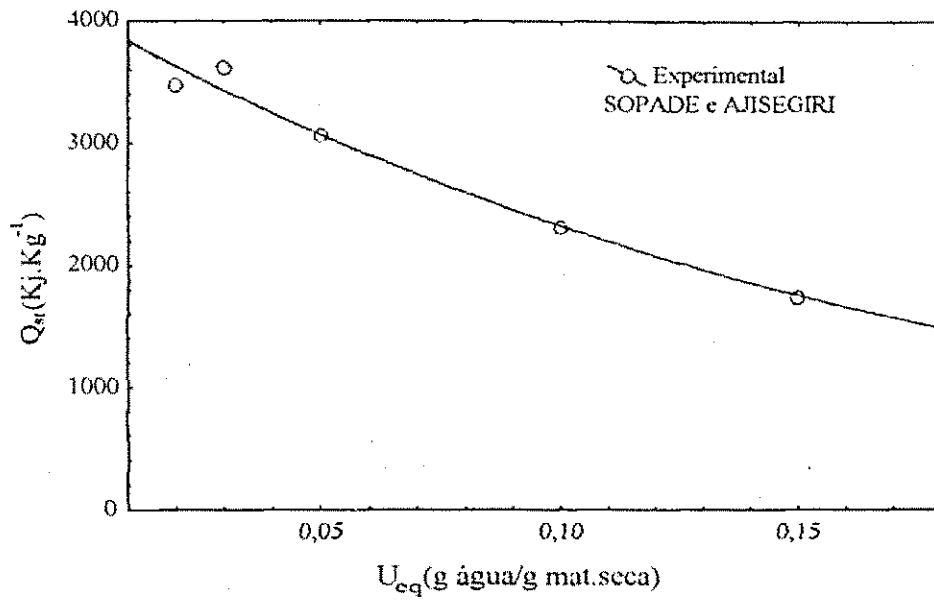


Figura 10. Calor isostérico de sorção em função do conteúdo de umidade da goiaba, ajustado pela equação de Sopade e Ajisegiri

5. CONCLUSÕES

Tendo-se como base os resultados apresentados e nas condições em que a pesquisa foi desenvolvida, pode-se concluir que:

1. As equações de GAB e Oswin foram as que melhores ajustaram os dados experimentais para todas as temperaturas estudadas, podendo ser escolhidas para representar a dessecção da goiaba.
2. A cinética de secagem da goiaba ocorre no período de taxa decrescente.
3. Para o mesmo tempo do processo, quanto maior for a temperatura do ar maior é a taxa de secagem e a perda de umidade da goiaba tende a estabilizar no período de 90 minutos.
4. O modelo empírico de segunda ordem foi o que obteve os valores de maior significância estatística.
5. As superfícies de respostas evidenciaram, que a temperatura é o fator controlador do processo de secagem e que a velocidade do ar de secagem tem uma pequena influência quando trabalhadas nas faixas de temperaturas maiores que 100°C e 2,0 m.s⁻¹, correspondendo estas como as melhores faixas de trabalho.
6. O calor isostérico de sorção diminui com o aumento da umidade de equilíbrio e a equação de Sopade e Ajisehiri apresentou um bom ajuste aos dados experimentais podendo ser utilizada para fins preditivos da goiaba nas umidades estudadas neste trabalho.

6. SUGESTÕES

1. Análise química e sensorial do produto final em função das condições do processo.
2. Modelagem matemática da cinética de secagem, considerando o encolhimento da fruta.
3. Estudar a influência do processo de secagem da goiaba na qualidade do produto final, através da textura e cor.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, E., MUHLBAUER, W., ESPER, A., WOLF, W. F., SPIESS, W. Effect of temperature on water sorption equilibrium of onion (*Allium cepa* L.). **Drying Technology**, New York, v.18, n.9, p.2117-2129, 2000.

ALMEIDA, F. de A. C., FONSECA, K., GOUVEIA, J. P.G. Secagem natural de gergilim e determinação da umidade de equilíbrio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.343-488, 1999.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**, 14. ed. Arlington, Virginia, 1984. 1.v. (várias paginações)

BARROS NETO, B. de, SCARMÍNIO, I. S., BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1995. 299 p.

BOBBIO, P. A. e BOBBIO, F. O. Água. In: **Química do processamento de alimentos**, São Paulo, Ed. Varela, p.11-24, 1992.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction designs, data analysis and model building**. Nova York: Wiley, 1978.

BOX, G. E. P. e WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by na approximate response function. **Universsity of Wisconsin Technical Report**. v. 9, 1973.

BOX, G. E. P. e WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions.J. Roy. Statist.Soc. B13, p. 1-38, 1951.

Referências bibliográficas

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W. B, HALL, C. H. **Drying and storage of grains and oilseed.** Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.). **Advances in drying.** Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1983. p.73-102.

CORRÊA, P. C., ALMEIDA, F. de A. C. Comparação de modelos matemático de equilíbrio higroscópico para semente e fibras de algodão herbáceo, cultivar redenção. **Revista Oleaginosas e Fibrosa**, Campina Grande, EMBRAPA-CNPA , v.3, n. 1, p. 7-12, 1999.

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des. **Science Aliments**, v.3, n.1, p.1-36, 1983.

DURAL, N. H. e HINES, A. L. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multiplayer adsorption on heterogeneous surfaces. **Journal of Food Engineering**. Barking, v.20, n. 1, p. 75-96, 1993.

GABAS, A. L. **Secagem de uva Itália em leito fixo.** 1998, 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

X GOUVEIA, J. P. G.de., ALMEIDA, F. A. C., FERNANDES, F. R., MURR, F. E. X. Estudo das isotermas de sorção e calor isostérico do gengibre sem casca. In: 28, 1999a CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, CD Rom, 1999.

GOUVEIA, J. P. G. de., ALMEIDA, F. A. C., SILVA, F. H e MURR, F. E. X. Estudo da cinética de secagem de gengibre em um secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 20-27, 1999b.

Referências bibliográficas

GOUVEIA, J. P. G. de. **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo.** 1999, 161f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimento, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal. of Research of Standards A. Physics and Chemistry**, v.8, n.1, p.92-93, 1977.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v.33, n.1 p.29-32, 1952.

KAYMAK-ERTEKIN, F., SULTANOGLU, M. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. **Journal of Food Engineering**, Barking, v.47, n.3, p.225-231, 2001.

KECHAOU, N., MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banana. **Drying Technology**, New York, v.17, n.6, p.1201-1213, 1999.

KHURI, A., CORNELL, J. A. **Response surface: designs and analyses.** American Society for quality Control, 1987.

KIRANOUDIS, C. T., TSAMI, E., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits. **Drying Technology**, New York, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

X KOLLER, O. C. **Cultura da goiaba.** Porto Alegre: editora Agropecuária, : 40p, 1979.

KROKIDA, M. K., KIRANOUDIS, C. T., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. Drying related properties of apple. **Drying Technology**, New York, v.18, n.6, p.1251-1267, 2000.

Referências bibliográficas

LACERDA FILHO, A. F. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café.** 1986, 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

LIMA, M. F.M. de. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro - Estudos fluidodinâmico térmico.** 1992, 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química: Processos Químicos) Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.

LOMAURO, C. J., BAKSHI, A. S., LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Par I: Fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies**, London, v.18, p.112-22, 1985.

MARTINS, J.H; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos.** Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. Campina Grande-PB, UFPB. 1984.

McMINN, W. A. M., MAGEE, T. R. A. Air drying kinetics of potato cylinders. **Drying Technology**, New York, v.14, n.9, p.2025-2040, 1996.

XMEDINA, J. C. Cultura. In: MEDINA, J. C. et al. **Frutas tropicais: Goiaba**, v.4 Campinas: ITAL(Instituto de Tecnologia de Alimentos), 1978. 45p.

MOURA, R. S. F de. **Estudo da cinética de secagem de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de leito fixo.** 2001, 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.

Referências bibliográficas

MURR, F. E. X. **Estudo comparativo dos fenômenos de secagem de batata (*Solanum tuberosum*, L. Cultivar Bintje)**. 1992. 188f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

NOREÑA, C. Z., HUBINGER, M. D. e MENEGALLI, F. C- Técnicas básicas de determinação de atividade de água: uma revisão. **Boletim SBCTA**, v.30, n.1, p.91-96, 1996.

NUCCI, M.C.C. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem na qualidade do gengibre seco**. 1995, 45f. Trabalho (Iniciação Científica) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

PARK, K. J. **Cinética de secagem**. Campinas, 1990. (Apontamentos do curso de pós-graduação - FEAGRI/UNICAMP)

PARK, K. J. **Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem**. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1987. 54p. (Tese, Livre Docência em Fenômenos de Transporte)

PERRY, J. H. **Chemical Engineer's Handbook**. 6. ed. New York: Mc Graw-Hill, 1984.

PRADO, M. E. T. **Secagem de tâmaras (*Phoenix dactylifera* L.) para a obtenção de tâmara passa**. 1998, 149f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

RAPUZAS, R. S. e DRISCOLL, R. H. The thin-layer drying characteristics of white onion slice, *Drying Technology*. New York, v.13,n.8 e 9, p.1905-1931, 1995.

SAMANIEGO-ESGUERRA, C. M., BOAG, I. F. e ROBERTSON, G.L. Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables. *Journal of Food Engineering*, Barking, v.13, n.2, p.115-133, 1991.

SILVA, J. E. da. *Secagem de vagens de algaroba *Prosopis juliflora* (S.W.) D.C. em laboratório e a nível de fazenda*. 1999, 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.

SILVA, F. L. H. *Modelagem, simulação e controle de fermentação alcoólica extrativa* 1998, 162f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos: Biotecnologia) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

SILVA, M. M. da., GOUVEIA, J. P. G. de, e ALMEIDA, F. A. C. Determinação do calor de sorção em polpa de manga. In: 16, 2000, Fortaleza. *Anais ... SOCIEDADE BRASILEIRO DE FRUTICULTURA*, 2000, CD Rom.

SIMAL, S., MULET, A. CATALÁ, P. J., CAÑELLAS, J e ROSSELLO, C. Moving bounday model for simulating moisture movement in grapes. *Journal of Food Science*, Chicago, v.61, n.1, p. 157-160, 1996.

SOPADE, P. A. e AJISEGIRI, E. S.. Moisture sorption study on nigerian foods: maiza e sorghum. *Journal of Food Process Engineering*, v.17, n.1, p.35-56, 1994.

TELIS, V. R. N., GABAS, A. L., MENEGALLI, F. C., TELIS, R. J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. *Thermochimica Acta*, v.343, n.1 e 2, p.49-56, 2000.

TOLABA, M. e SUARÉZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, London, v. 21, n.2, p. 83-85, 1995.

UNADI, A., FULLER, R. J., MACMILLAN, R. H. Prediction of the equilibrium moisture content of tomatoes. **Food Australia**, v.50, n.4, p.200-203, 1998.

VAGENAS, G. K., MARINOS-KOURIS, D. e SARAVACOS, G. D. Thermal properties of raisins. **Journal of Food Engineering**, Barking, v.11, p. 147-158, 1990.

VÁZQUEZ, G., CHENLO, F., MOREIRA, R e CRUZ, E. Grape drying in a pilot plant with a heat pump. **Drying Technology**. New York, v.15, n.3 e 4, p.899-920, 1997.

VERGARA, F., AMEZAGA, E., BARCENAS, M. E., WELTI, J. Analysis of the drying processes of osmotically dehydrated apple using the characteristic curve model. **Drying Technology**, New York, v.15, n.3 e 4, p.949-963, 1997.

WANG, N., BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, Barking, v.14, n.1, 1991.

YOSHIDA, C. M. P. **Cinética de secagem do milho super doce**. 1997, 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos: Secagem de Produtos Agrícolas) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

ZHANG, X., LIU, X., GU, D., ZHOU, W., WANG, R e MARINOS-KOURIS, D. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science and Food Agriculture**, v.70, p.303-306, 1996.

A.1 – Resultados da cinética de secagem da goiaba

	T=76°C Var=1,5m.s ⁻¹	T=80°C Var=1,0m.s ⁻¹	T=80°C Var=2,0m.s ⁻¹	T=90°C Var=0,8m.s ⁻¹	T=90°C Var=1,5m.s ⁻¹	T=90°C Var=1,5m.s ⁻¹	T=90°C Var=1,5m.s ⁻¹	T=90°C Var=2,1m.s ⁻¹	T=100°C Var=1,0m.s ⁻¹	T=100°C Var=2,0m.s ⁻¹	T=104°C Var=1,5 m.s ⁻¹
tempo (min)	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*	(adm)*
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,894426	0,919636	0,894285	0,902185	0,854139	0,877446	0,890132	0,859715	0,861414	0,767939	0,866597
10	0,814796	0,822791	0,786745	0,819832	0,753541	0,796115	0,790946	0,727603	0,745562	0,650229	0,727606
15	0,775366	0,744624	0,717729	0,747059	0,670025	0,719117	0,696211	0,643916	0,657739	0,56687	0,63157
20	0,688672	0,685293	0,65273	0,669748	0,597605	0,648966	0,624873	0,573396	0,57194	0,486412	0,553169
25	0,633188	0,629728	0,600511	0,61563	0,528106	0,599078	0,556205	0,500454	0,501557	0,426412	0,475642
30	0,586823	0,574635	0,535695	0,555966	0,47058	0,541504	0,495041	0,425091	0,435067	0,371298	0,418893
40	0,50899	0,473081	0,432536	0,461849	0,373631	0,448295	0,381358	0,333838	0,324509	0,280916	0,308539
50	0,431287	0,379218	0,346905	0,369076	0,302818	0,371856	0,296923	0,250454	0,241358	0,229008	0,242535
60	0,364629	0,318003	0,288297	0,295798	0,255804	0,307714	0,236648	0,2046	0,182031	0,195725	0,20447
90	0,234524	0,186941	0,179843	0,181849	0,194189	0,207937	0,167472	0,167373	0,1635	0,171756	0,180024
120	0,184819	0,153194	0,17327	0,161681	0,175938	0,183203	0,159207	0,173577	0,159452	0,168092	0,176358
150	0,173388	0,148485	0,169801	0,157479	0,170244	0,176635	0,157553	0,160714	0,157739	0,166107	0,174262
180	0,170691	0,146288	0,167793	0,156303	0,168784	0,174539	0,156027	-	-	-	-
210	0,169407	-	-	-	0,167324	-	-	-	-	-	-

adimensional de umidade = $(X-X_e)/(X_0-X_e)$

A.2 – Resultado da análise de variância para o tempo de 5 minutos

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	gl 1ª ordem	Gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,013426	0,01149	1	1	0,013426	0,01149	85,04974	22,77	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,000789	0,004542	5	9	0,000158	0,000505			Fc/Ft R	12,86	4,45
F. de ajuste	0,001458	0,003873	3	7	0,000486	0,000553	1,453562	1,65	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,000669	0,000669	2	2	0,000334	0,000334	R ²	R ²	Fc/Ft Fa	0,076	0,085
Total	0,014215	0,016031	6	10	0,002369	0,001603	0,72	0,83			

Modelo Linear → $Adm = 0,8662 - 0,04622T - 0,0298V$

Modelo quadrático → $Adm = 0,8737 - 0,2804T - 0,0017T^2 - 0,0022V - 0,0015V^2 - 0,0171TV$

A.3 – Resultado da análise de variância para o tempo de 10 minutos

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	Gl 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,018107	0,01425	1	1	0,018107	0,01425	26,7	9,7	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,003395	0,013224	5	9	0,000679	0,001469	-		Fc/Ft R	4	1,9
F. de ajuste	0,002313	0,012141	3	7	0,000771	0,001734	1,4	3,21	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,001083	0,001083	2	2	0,000541	0,000541	R ²	R ²	Fc/Ft Fa	0,073	0,17
Total	0,019189	0,027474	6	10	0,003198	0,002747	0,82	0,90			

Modelo Linear → $Adm = 0,7633 - 0,05352T - 0,329V$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,7798 - 0,04221T - 0,0098T^2 - 0,0328V - 0,0085V^2 - 0,0148TV$

A.4 – Resultado da análise de variância para o tempo de 15 minutos

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	GI 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,019626	0,036205	1	1	0,019626	0,036205	31	108,7	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,003173	0,002998	5	9	0,000635	0,000333	-	-	Fc/Ft R	4,7	21,2
F. de ajuste	0,001963	0,001789	3	7	0,000654	0,000256	1,1	0,42	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,00121	0,00121	2	2	0,000605	0,000605	R ²	R ²	Fc/Ft Fa	0,06	0,022
Total	0,020836	0,037415	6	10	0,003473	0,003741	0,85	0,92			

Modelo Linear → $Adm = 0,6812 - 0,0595T - 0,0295V$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,538 - 0,104 T + 0,002 T^2 - 0,009 V + 0,024 V^2 + 0,005 TV$

A.5 – Resultado da análise de variância para o tempo de 20 minutos

Fonte de Variação	SQ 1ª ordem	SQ 2ª ordem	GI 1ª ordem	gl 2ª ordem	MQ 1ª ordem	MQ 2ª ordem	teste F 1ª ordem	teste F 2ª ordem	Ft (95%)	1ª ordem	2ª ordem
Regressão	0,024877	0,039091	1	1	0,024877	0,039091	40,45	106	Ft R	6,61	5,12
Resíduos	0,003075	0,003319	5	9	0,000615	0,000369	-	-	Fc/Ft R	6,12	20,7
F. de ajuste	0,001751	0,001996	3	7	0,000584	0,000285	0,88	0,43	Ft Fa	19,16	19,35
Erro puro	0,001324	0,001324	2	2	0,000662	0,000662	R ²	R ²	Fc/Ft Fa	0,046	0,02
Total	0,026201	0,040415	6	10	0,004367	0,004041	0,88	0,92			

Modelo Linear → $Adm = 0,6090 - 0,0700T - 0,0296V$

Modelo Quadrático → $Adm = 0,6232 - 0,1180T - 0,0070T^2 - 0,00319V - 0,0066V^2 - 0,01326T V$