

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS

RENATO SOUZA RODOVALHO

**DETERMINAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE
SORÇÃO DO ARROZ-VERMELHO (*Oryza sativa* L.)**

Anápolis – GO

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RENATO SOUZA RODOVALHO

**DETERMINAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE
SORÇÃO DO ARROZ-VERMELHO (*Oryza sativa* L.)**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. DS. Ivano Alessandro Devilla

**Anápolis
2008**

**DETERMINAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ISOTERMAS DE
SORÇÃO DO ARROZ-VERMELHO (*Oryza sativa* L.)**

Por
Renato Souza Rodovalho

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA.

Aprovada em ____/____/____

Prof. D.S. Ivano Alessandro Devilla
Orientador
UEG / UnUCET

Prof. D.S. Diego Palmiro Ramirez
Ascheri
UEG / UnUCET

D.S. Paulo César Afonso Júnior
Embrapa

Dedico este trabalho a Deus por gratidão a
mais uma etapa concluída em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a oportunidade de chegar até aqui, uma grande etapa de várias que ainda virão na minha vida, com pessoas tão especiais que são mais do que minha família: são meus verdadeiros amigos. Agradeço ao meu orientador D.S. Ivano Alessandro Devilla pela sua atenção e paciência comigo que sempre me motivou a crescer. Ao Professor D.S. Diego Palmiro Ramirez Ascheri pela atenção e ajuda que sempre nos proporcionou para os experimentos e a dissertação. Ao D.S. Paulo César Afonso Júnior por participar à banca examinadora e por haver contribuído muito com meu trabalho. A todos os amigos e colegas do mestrado que me ajudaram muito a superar as dificuldades e alcançar o objetivo final. E especialmente, agradeço a Nádia, minha esposa, que também é vitoriosa comigo por chegar até aqui, por ter me dado muito amor e compreensão em inúmeras situações difíceis que passamos juntos.

RESUMO

O arroz-vermelho é um produto agrícola tradicional em vários países, como o Brasil e Argentina, para uso e cultivo na agricultura familiar. Porém, encontra-se em extinção devido à preferência pelo arroz branco. Visando a manutenção da qualidade dos grãos nos processos de secagem e armazenamento este trabalho objetivou determinar as isotermas de adsorção e dessorção do arroz-vermelho variedades PB01 Tradicional e PB05 para as temperaturas de 30, 50 e 70 °C e umidades relativas de 10 a 97%. A determinação da umidade de equilíbrio foi realizada usando o método estático com o uso de soluções salinas saturadas. Os modelos de BET, Chen Clayton, Chung Pfof, Chung Pfof Modificado, Copace, GAB, Oswin, Oswin Modificado e Smith foram ajustados aos valores experimentais e recomendados aqueles que apresentaram os melhores coeficientes de determinação (R^2), o erro médio estimado (SE) mais reduzido, o erro médio relativo inferior a 10% e a distribuição de resíduos aleatória. Concluiu-se que: (a) as isotermas do arroz-vermelho, variedades PB01 e PB05, possuem formato sigmoidal, característico de curvas do tipo II; (b) em uma umidade relativa constante, o aumento da temperatura promove a redução do teor de umidade de equilíbrio; (c) para representação das curvas de equilíbrio em adsorção da variedade PB01, os modelos de Chung Pfof Modificado é recomendado para as temperaturas de 30 e 50 °C e o modelo de Smith é recomendado para a temperatura de 70 °C; (d) o modelo de GAB é o recomendado para PB05 no processo de adsorção e em todas as temperaturas estudadas; (e) no processo de dessorção, os modelos recomendados para PB01 são Chen Clayton à 30°C, Smith a 50 °C e Chung Pfof Modificado a 70 °C; (f) os modelos matemáticos recomendados para a variedade PB05 são Chung Pfof a 30 °C, BET a 50 °C e Chung Pfof Modificado a 70 °C para dessorção; (g) considerando o intervalo de temperatura entre 30 a 70 °C, o modelo de Chen Clayton é o recomendado para representar a higroscopicidade do arroz-vermelho das variedades PB01 e PB05, nos processos de adsorção e dessorção; (h) a histerese do arroz-vermelho é diretamente proporcional ao aumento da temperatura.

ABSTRACT

Red rice is a traditional agricultural product in many countries like Brazil and Argentina, and it is used as the families' agricultural sustenance. However, red rice is becoming extinct due to its competition with white rice. In an attempt to maintain the quality of the grains in the drying and storage processes, this paper wishes to determine the adsorption and desorption isotherms of Red Rice in the PB01 and PB05 cultivations at temperature levels of 30 to 70° C, as well as relative moisture of 11 to 97%. In order to determine equilibrium moisture content, the static method was used. BET, Chen Clayton, Chung Pfof, Modified Chung Pfof, Copace, GAB, Oswin, Modified Oswin and Smith models were adjusted to the experimental values. The conclusions were: (a) the isotherms of rough red rice, PB01 and PB05 cultivations, have a sigmoidal shape, characteristic of type II curves; (b) at constant relative humidity, the increase in temperature promotes a decrease in the equilibrium moisture content; (c) the recommended model for hygroscopic equilibrium content estimates for red rice PB01 cultivation is Chen Clayton's model, for 30 and 50 °C and Smith's model for 70 °C at the adsorption process. (d); the GAB' model is recommended for PB05 cultivation for adsorption process at the temperature between 30 and 70 °C; (e) at the desorption process, models recommended are Chen Clayton in 30 °C, Smith in 50 °C and Modified Chung Pfof in 70 °C for PB01; (f) the mathematics' models recommended for PB05 area Chung Pfof in 30 °C, BET in 50 °C and Modified Chung Pfof in 70 °C at desorption experiments; (g) at the temperatures between 30 and 70 °C, the Chen Clayton's model is recommended to represent the hygroscopic equilibrium of the red rough rice, PB01 and PB05 cultivations, for sorption isotherms; (d) the hysteresis is direct proportion with the increase of the temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Isoterma genérica de adsorção e dessorção segundo Ditchfield (2000)	26
Figura 2	Os cinco Tipos de isotermas de sorção segundo (BRUNAUER et al. 1938).....	27
Figura 3	Representação esquemática de uma isoterma de adsorção de água para faixas de baixa umidade de um alimento (20 °C) (BOBBIO e BOBBIO, 2001).....	28
Figura 4	Esquema dos recipientes utilizados no experimento.	46
Figura 5	Isotermas de adsorção do arroz-vermelho variedade PB01 estimado pelo modelo de Chen Clayton	64
Figura 6	Isotermas de adsorção do arroz-vermelho variedade PB05 estimado pelo modelo de Chen Clayton	64
Figura 7	Isotermas de dessorção do arroz-vermelho variedade PB01 estimado pelo modelo de Chen Clayton	65
Figura 8	Isotermas de dessorção do arroz-vermelho variedade PB05	65
Figura 9	Histerese do arroz-vermelho PB01	66
Figura 10	Histerese do arroz-vermelho PB05	67
Figura 1A	Pesagem diária dos recipientes de sorção com amostras de arroz-vermelho variedades PB01 e PB05 para os experimentos de adsorção e dessorção.	76
Figura 1B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 30 °C.....	77
Figura 2B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 50 °C.....	77
Figura 3B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 70 °C.....	78
Figura 4B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção no intervalo de temperatura 30 a 70 °C.	78
Figura 5B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 30 °C.....	79
Figura 6B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 50 °C.....	79
Figura 7B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 70 °C.....	80
Figura 8B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção no intervalo de temperatura °C.....	80

Figura 9B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 30 °C.	81
Figura 10B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 50 °C.	81
Figura 11B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 70 °C.	82
Figura 12B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção no intervalo de temperatura °C.	82
Figura 13B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 do processo de dessorção à 30 °C.	83
Figura 14B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção à 50 °C.	83
Figura 15B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção à 70 °C.	84
Figura 16B	Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção no intervalo de temperatura °C.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Definições e termos utilizados na produção, beneficiamento e comercialização dos Grãos de Arroz.....	17
Tabela 2	Classificação do arroz em casca natural de acordo com as dimensões independente do sistema de cultivo.	18
Tabela 3	Classificação do arroz em casca natural quanto ao tipo (limites máximos de tolerância de defeitos/tipo, % em peso)	18
Tabela 4	Produção e consumo de arroz no mundo (milhões de toneladas, base casca) no ano de 2000.....	19
Tabela 5	Umidade relativa de soluções saturadas de sais a diferentes temperaturas.	31
Tabela 6	Quantidades de sal (g) e de água para se obter a atividade de água (Aw)	31
Tabela 7	Equações de regressão linear de sais para predição de atividade de água	32
Tabela 8	Equações para predição de atividade de água de diferentes sais.....	32
Tabela 9	Modelos matemáticos para determinação de umidade de equilíbrio	36
Tabela 10	Atividades de água de vários sais nas temperaturas de 30, 50 e 70 °C estimadas pelas equações de Labuza et al. 1985.....	44
Tabela 11	Modelos matemáticos utilizados para ajuste aos dados experimentais.....	46
Tabela 12	Dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico do Arroz-vermelho em diferentes temperaturas e umidades relativas no processo de adsorção	49
Tabela 13	Teores de umidade de equilíbrio higroscópico (decimal, b.s.) do arroz-vermelho, PB01e PB05 obtidos por adsorção para diferentes temperaturas e umidades relativas.....	50
Tabela 14	Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB01 no processo de adsorção	51
Tabela 15	Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB05 no processo de adsorção	54
Tabela 16	Número de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico de todos do Arroz-vermelho em diferentes temperaturas e umidades relativas no processo de dessorção.....	56
Tabela 17	Teores de umidade de equilíbrio higroscópico do arroz-vermelho obtidos por dessorção	57

Tabela 18	Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB01 para o processo de dessorção	58
Tabela 19	Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB05 para o processo de dessorção.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 ARROZ 16	
2.1.1 Características importantes do arroz.....	16
2.1.2 Produção do Arroz	19
2.1.3 Regiões produtoras no Brasil	19
2.1.4 Arroz-vermelho.....	21
2.1.4.1 Histórico	21
2.1.4.2 A Preservação e Pesquisa do Arroz-vermelho.....	22
2.2 PROCESSOS DE SECAGEM E ARMAZENAMENTO	23
2.3 UMIDADE DE EQUILÍBRIO E ISOTERMAS DE SORÇÃO.....	25
2.3.1 Atividade de Água	26
2.3.2 Tipos de isotermas	27
2.3.4 Determinação das isotermas.....	29
2.3.4.1 Método estático	30
2.3.4.2 Método dinâmico	33
2.3.4.3 Soluções salinas saturadas.....	30
2.3.4.4 Modelos matemáticos para prever a umidade de equilíbrio	33
2.3.5 Pesquisas relacionadas a isotermas de produtos agrícolas.....	36
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 MATÉRIA - PRIMA.....	44
3.2 PREPARO DAS SOLUÇÕES	44
3.3 PREPARO DAS AMOSTRAS	45
3.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA	45
3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SORÇÃO DE ÁGUA.....	45
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 PROCESSO DE ADSORÇÃO	49
4.1.1 Determinação da umidade de equilíbrio	49
4.1.2 Modelagem matemática da umidade de equilíbrio.....	50
4.2 PROCESSO DE DESSORÇÃO	56

4.2.1 Determinação da umidade de equilíbrio	56
4.2.2 Modelagem matemática da umidade de equilíbrio higroscópico.....	57
4.3 ISOTERMAS DE SORÇÃO DO ARROZ-VERMELHO	63
5 CONCLUSÃO	68
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
APÊNDICE	75
APENDICE A	76
APENDICE B	77

1 INTRODUÇÃO

O arroz é originário da Ásia Sul-Oriental, região que inclui hoje, a China, a Índia e a Indochina, sendo que evidências arqueológicas na China e na Índia atestam a existência do cereal há cerca de 7000 anos (FREITAS e FILHO, 2007).

Historicamente, o arroz é o cereal mais cultivado e consumido pelo homem em todos os continentes, destaca-se pela produção e área de cultivo, desempenhando papel estratégico tanto nos aspectos econômicos quanto tradicionais, culturais entre os países e regiões. E no comércio podem ser encontrados vários tipos de arrozes, como o arroz branco, o arroz aromático, o arroz-verde, o arroz-preto, o arroz-arbóreo, o arroz-vermelho e muitos outros (PEREIRA e RAMOS, 2004).

De acordo com Alonso et al. (2005), o Brasil, está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com cerca de 11 milhões de toneladas para um consumo de 11,7 milhões de toneladas. Essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: irrigado e sequeiro. O cultivo do arroz irrigado destaca-se na região sul e representa 60% da produção no Brasil. Enquanto, na região do Brasil Central é cultivado o arroz de sequeiro.

O Brasil é um dos poucos países do mundo que ainda dispõe de populações extensivas de espécies silvestres de arroz e de variedades tradicionais em condições naturais. E para a conservação dessa variabilidade e promoção do seu uso, instituições de pesquisas vêm conduzindo expedições para coleta dos germoplasmas desde a década de 70 (RANGEL et al., 2006).

O arroz-vermelho é uma espécie do gênero *Oryza* que veio para o Brasil no século XVII assim como outros cereais tradicionais. Apesar de serem espécies que foram apreciadas pela comunidade regional daquele período, mas devido a grande procura do mercado pelo arroz branco, estes produtos deixaram de ser cultivados. Desde então, muitos destes cereais se encontram em extinção (PEREIRA e RAMOS, 2004). Atualmente algumas variedades do arroz-vermelho passaram a serem consideradas como plantas daninhas, vistas como o principal entrave à elevação do rendimento do arroz branco (MARCHEZAN et al., 2001). Assim como muitos autores, Santos et al. (2002) recomendam técnicas de arroz irrigado para reduzir consideravelmente a incidência de arroz-vermelho como planta daninha.

Pereira e Ramos (2004), verificaram que o arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.) é uma espécie que se adaptou muito bem em regiões semi-áridas pouco favoráveis para produção de outros produtos. Alguns pesquisadores vem desenvolvendo séries de pesquisas que visam resgatar o arroz-vermelho para exploração pela agricultura familiar de regiões semi-áridas e demais locais favoráveis ao seu desenvolvimento e comercialização.

Por ser um produto sazonal consumido freqüentemente, o arroz necessita de um sistema de cultivo capaz de suprir as demandas dos mercados consumidores, durante a entressafra, mantendo um padrão de qualidade. Com este fim, podem ser utilizados vários sistemas de armazenagem, destacando-se o armazenamento em silos do produto a granel, ou a utilização de armazéns, mantendo o produto ensacado (RESENDE et al., 2006a).

Durante o armazenamento do arroz, podem ocorrer mudanças físicas, químicas e microbiológicas que, dependendo da interação entre estes fatores e o meio ambiente, podem ocasionar perdas de qualidade do produto. Dessa forma, há necessidade de conhecer as relações que existem entre o produto e o ambiente com o intuito de amenizar estas possíveis alterações (BANASZEK e SIEBENMORGEN, 1990b). Todo produto agrícola tem capacidade de absorver ou perder água para o ambiente a fim de manter uma relação de equilíbrio entre o teor de água no interior do produto com as condições do ambiente. Esse teor de água de equilíbrio, ou umidade de equilíbrio é alcançado quando a pressão parcial de vapor de água do produto iguala-se com a pressão de vapor de água com ambiente em função de sua temperatura e umidade relativa.

As curvas de equilíbrio higroscópico são muito importantes para estimar as mudanças de teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente que garantem a qualidade do produto durante os processos de secagem e armazenamento.

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários pesquisadores, que descrevem modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura. Silva et al. (2000a), mostram que existem dois tipos de métodos para determinação da umidade de equilíbrio: O método estático, em que o ar do ambiente está preso em recipientes herméticos e o método dinâmico, em que o ar está em movimento no interior de câmaras.

Para representação dos gráficos de isotermas com os dados experimentais são utilizados modelos matemáticos empíricos. Existem na literatura inúmeras equações propostas para representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas.

Na literatura consultada não foram encontradas referências sobre as curvas de equilíbrio higroscópico do arroz-vermelho. Uma vez que este arroz seja comercializado, estudar a umidade de equilíbrio em função das temperaturas e umidades relativas é de grande importância para secagem e armazenagem do produto.

No presente trabalho determinaram-se e modelaram-se as isotermas de sorção dos grãos de arroz-vermelho em casca para as variedades PB01 e PB05, nas temperaturas de 30, 50 e 70 °C e umidades relativas que variaram de 10 a 97%.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ARROZ

O arroz é o cereal mais consumido mundialmente pela humanidade, destacando-se não apenas pela produção e cultivo, mas também pelo aspecto econômico e social por ser um produto acessível a todas as classes sociais do mundo. Há a existência de vários tipos de arrozes que atendem a todos os gostos e fornecem grande potencial energético (ALONSO et al., 2005).

O arroz é provavelmente originário da Ásia Sul-Oriental região que inclui hoje, a China, a Índia e a Indochina, sendo que evidências arqueológicas na China e na Índia atestam a existência do cereal há cerca de 7000 anos (FREITAS e FILHO, 2007).

A literatura registra a existência de duas espécies de arroz cultivado: *Oryza sativa* e *Oryza glaberrima*. A primeira é originária da Ásia e está amplamente dispersa por todas as regiões tropicais e temperadas do mundo, enquanto a segunda tem a África Ocidental como seu centro de origem e está sendo paulatinamente substituída pelo arroz asiático. Com o processo evolutivo e de domesticação a que se submeteu a *Oryza sativa*, surgiram inúmeros tipos geneticamente divergentes os quais foram se adaptando às mais variadas condições agroecológicas, estando a espécie atualmente subdividida em duas principais subespécies, grupos ou raças ecogeográficas: Indica e Japônica (PEREIRA et al., 2007).

2.1.1 Características importantes do arroz

Segundo Soares et al. (2001), o arroz é uma planta herbácea na qual existem 250 mil espécies catalogadas, entre essas, 30 mil são utilizadas para consumo. Seus grãos, além de serem consumidos após beneficiamento, são utilizados pela indústria de cerveja, aguardente, álcool e vinagre.

A cultura do arroz é extremamente versátil e se adapta a diferentes condições de solo e clima, e por isso se tornou tão popular no mundo, sendo considerada a espécie de maior potencial de aumento de produção para o combate da fome mundial. É um dos alimentos com melhor balanceamento nutricional, fornecendo 20% da energia e 15% da proteína *per capita* necessária ao homem (ALONSO et al., 2005; FREITAS E FILHO, 2007).

A portaria nº 269, 17/11/88 do Ministério do Estado da Agricultura (BRASIL, 1988) define as características de identidade, qualidade, embalagem apresentação do arroz em casca, do arroz beneficiado (integral, parboilizado, integral e polido) e dos fragmentos de arroz que se destinam à comercialização. Primeiramente, entende-se por arroz os grãos provenientes das espécie *Oryza sativa*. E são definidos os termos de arroz comercializados conforme a Tabela 1.

TABELA 1 - Definições e termos utilizados na produção, beneficiamento e comercialização dos Grãos de Arroz

Termo	Descrição
Arroz brilhado	O produto que, após o polimento, recebe uma camada de talco ou glicose.
Arroz em casca natural	O produto que, antes do beneficiamento, não passa por qualquer preparo industrial ou processo tecnológico aditivo.
Arroz glutinoso	Variedade de arroz cujos grãos são brancos e de aspecto opaco, sem textura vítrea e que tende a empapar quando cozido.
Arroz integral (esbramado)	O produto do qual somente se retira a casca durante o beneficiamento, mantendo-se intacto o germe e as camadas interna e externa do grão, sendo obtido a partir do arroz em casca natural ou parboilizado.
Arroz mal polido	O produto do qual somente se retira a casca durante o beneficiamento, mantendo-se intacto o germe e as camadas interna e externa do grão, sendo obtido a partir do arroz em casca natural ou parboilizado.
Arroz oleado	O produto que, após o polimento, recebe uma camada de óleo comestível.
Arroz parboilizado	O produto que, ao ser beneficiado, os grãos apresentam uma coloração amarelada, em decorrência do tratamento hidrotérmico.
Arroz polido	O produto que, ao ser beneficiado, retira-se o germe, a camada externa e a maior parte da camada interna do tegumento, podendo ainda apresentar grãos com estrias longitudinais, visíveis a olho nu.
Defeitos gerais	Os grãos danificados, manchados, picados, amarelos, rajados, gessados e não parboilizados.
Defeitos gerais agregados	O somatório dos defeitos gerais encontrados na amostra.
Defeitos graves	As matérias estranhas, impurezas, os grãos mofados, ardidos, pretos e não gelatinizados.
Fisiologicamente desenvolvido	O grão que atinge o estágio de desenvolvimento completo da variedade (ciclo vegetativo) e está em condição de ser colhido.
Fragmento de grão	O produto constituído de no mínimo 90,00% de grãos quebrados e quirera.
Germe	A pequena porção situada numa das extremidades do grão da qual germina a semente.
Grão amarelo	O grão descascado e polido inteiro ou quebrado que apresentar coloração amarelada.
Grão ardido	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar no todo ou em parte, coloração escura proveniente do processo de fermentação.
Grão danificado	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar pelo processo de imersão ou secagem apresenta ruptura no sentido longitudinal, bem como, o grão que estoura (pipoca).
Grão gelatinizado	O grão inteiro ou quebrado, que se apresenta no mínimo com a sua camada externa gelatinizada e translúcida, quando observado sob luz Polarizada.
Grão gessado	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar coloração totalmente opaca e semelhante ao gesso.
Grãos inteiros	O grão descascado e polido, que apresentar comprimento igual ou superior a três quartas partes do comprimento mínimo da classe a que pertence.
Grão manchado e picado	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar mancha escura ou esbranquiçada, bem como, perfuração por insetos ou outros agentes, desde que visíveis a olho nu.
Grãos mofados	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar no todo ou em parte, fungo (bolor), visível a olho nu.
Grão não gelatinizado	O grão inteiro ou quebrado, não apresenta gelatinização do amido, parboilização deficiente, totalmente “opaco” sob a luz polarizada.
Grão não parboilizado	O arroz descascado e polido, inteiro ou quebrado que não sofreu o processo de parboilização, correspondendo por tanto, ao arroz beneficiado polido.
Grão preto	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que se apresentar totalmente enegrecido por ação excessiva de calor e umidade.

TABELA 1 – Continuação

Termo	Descrição
Grão quebrado	Pedaço de grão arroz descascado e polido, que apresentar comprimento inferior a três quartas partes do comprimento mínimo da classe a que pertence e que ficar retido em peneira de furos circulares de 1,6 milímetros de diâmetro.
Grãos rajados	O grão descascado e polido, inteiro ou quebrado que apresentar estria vermelha.
Grau de polimento	Expressa a maior ou menor intensidade de remoção do germe e das camadas externas e interna do grão.
Impureza	Detrito do próprio produto como a casca e pedaço de talo, entre outros.
Matérias estranhas	Corpo ou detrito de qualquer natureza, estranhos ao produto, como grãos ou sementes de outras espécies vegetais, sujidades e resto, de insetos entre outros.
Parboilização	Processo hidrotérmico no qual o arroz em casca é imerso em água potável, a uma temperatura acima de 58°C (cinquenta e oito graus centígrados) seguido de gelatinização parcial ou total do amido e secagem.
Quirera	O fragmento de grão de arroz que vazar em peneira de furos circulares de 1,6 milímetros de diâmetro.
Renda do beneficiado	O percentual de arroz beneficiado ou beneficiado polido, resultante, do benefício do arroz em casca.
Rendimento do grão	Os percentuais de grãos inteiros e de grãos quebrados, resultante do benefício do arroz.
Tegumento	Uma das camadas internas comestíveis do grão.
Umidade	O percentual de água encontrada na amostra em seu estado original.

Fonte: BRASIL, 1988.

O arroz ainda é classificado quanto ao grupo, a classe e o tipo conforme mostram as Tabelas 2 e 3.

TABELA 2 - Classificação do arroz em casca natural de acordo com as dimensões independente do sistema de cultivo.

Classes	Comprimentos (c) e Espessura (esp)
Longo fino	≥ 6 mm (c) e máx. 1,85 mm (esp)
Longo	≥ 6 mm (c)
Médio	5-6 mm (c)
Curto	< 5 mm (c)
Misturado	Mistura de 2 ou mais classes

Fonte: BRASIL, 1988.

TABELA 3 - Classificação do arroz em casca natural quanto ao tipo (limites máximos de tolerância de defeitos/tipo, % em peso)

Tipo	Defeitos graves	Defeitos gerais adequados
1	0,25	4,00
2	0,50	8,00
3	1,00	14,00
4	2,00	22,00
5	4,00	34,00

Fonte: BRASIL, 1988.

Os tipos de grãos mais consumidos no Brasil são o Tipo 1 e o parboilizado, sendo que o primeiro representa de 70 a 80 % do mercado de arroz polido branco e o restante entre o segundo e o tipo 2. Esse produto é fundamental no cardápio das famílias de baixa renda, já que atende em grande medida as necessidades calóricas e protéicas dessa população (FREITAS e FILHO, 2007).

Dentre as variedades existentes, as mais comuns no Brasil são: Glutinoso, Grano Largo, Grano Médio, Vaporizado, Grano Redondo, Salvaje, Basmati, Integral e Tailandês. Para esses grãos recomenda-se que a secagem ocorra nas temperaturas de 40 a 50 °C para evitar danos. A casca funciona como uma barreira contra a penetração de umidade, dos insetos e fungos no período de armazenagem (SOARES et al., 2001).

2.1.2 Produção do Arroz

De acordo com Alonso et al. (2005), cerca de 150 milhões de hectares de arroz são cultivados anualmente no mundo, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado. O arroz, por ser um grão economicamente importante, é considerado o cultivo alimentar mais significativos em muitos países em desenvolvimento, principalmente na Ásia e Oceania, onde vivem 70% da população total dos países em desenvolvimento e cerca de dois terços da população subnutrida mundial. É alimento básico para cerca de 2,4 bilhões de pessoas e, segundo estimativas, até 2050, haverá uma demanda para atender ao dobro desta população. A América Latina ocupa o segundo lugar em produção e o terceiro em consumo conforme mostrado na Tabela 4.

Assim como na Ásia, o arroz é um produto importante na economia de muitos dos países latino-americanos pelo fato de ser item básico na dieta da população, como nos casos do Brasil, Colômbia e Peru. Ainda pode ser um produto importante no comércio internacional, como no de Uruguai, Argentina e Guiana, como exportadores, no caso do Brasil, México e Cuba, entre outros, como importadores.

A produção mundial de arroz não vem acompanhando o crescimento do consumo. Nos últimos seis anos, a produção mundial aumentou cerca de 1,09% ao ano, enquanto a população cresceu 1,32% e o consumo 1,27%, havendo grande preocupação em relação a estabilização da produção mundial.

TABELA 4 - Produção e consumo de arroz no mundo (milhões de toneladas, base casca) no ano de 2000

	África	América Latina e Caribe	América do Norte e Central	Ásia
Produção	17,3	23,1	12,0	546,8
Consumo	21,2	20,1	8,3	469,9

Fonte: ALONSO et al. (2005).

2.1.3 Regiões produtoras no Brasil

Alonso et al. (2005) relatam que o Brasil, está entre os dez principais produtores mundiais de arroz, com cerca de 11 milhões de toneladas para um consumo de 11,7 milhões de toneladas base

casca. Essa produção é oriunda de dois sistemas de cultivo: irrigado e de sequeiro. No ano 2000 a produção no valor de R\$ 3,34 bilhões, representou 6,7% do valor bruto da produção agrícola nacional (R\$ 49,75 bilhões). Apenas a soja, o milho, o café e cana-de-açúcar têm valor bruto maior do que a orizicultura. A orizicultura irrigada é responsável por 65% da produção nacional, porém, com baixa rentabilidade, devido ao alto custo de produção e distorções de mercado.

A produção, por sua vez, vem aumentando significativamente, com exceção das safras que ocorreram eventos climáticos desfavoráveis. A maior produção brasileira de arroz ocorreu na safra 2003/2004, com 12,7 milhões de toneladas o que permitiu o país a ocupar o décimo primeiro lugar como produtor mundial de arroz, e o maior produtor da América do Sul (FREITAS e FILHO, 2007).

No Brasil, para a safra 2005/2006, a área cultivada com arroz aproximou-se de 3,2 milhões de hectares. O Rio Grande do Sul, com destaque para a Metade Sul do estado, onde a produção se concentra, colhe anualmente cerca de 6 milhões de toneladas, o equivalente a 50% do total da produção brasileira. O estado do Ceará obteve uma grande produção em torno de 121.984 toneladas superior a safra anterior (2004/2005), do clima ter favorecido o cultivo da cultura de sequeiro responsável pela elevação desta safra (LIMA, 2006).

Tomando os dados da safra 2006/2007 observa-se que a maior quantidade de arroz em casca ocorre, normalmente, no início do ano durante o período de safra e é produto originário de países vizinhos. Se for extraída a quantidade de arroz em casca e tratando-se apenas dos produtos beneficiados ou semi-beneficiados, verifica-se que o percentual de arroz branco torna-se ainda mais expressivo. No período de março de 2006 a fevereiro de 2007, o total de arroz industrializado foi de 795,9 mil toneladas (base casca), sendo que 66,90% era de arroz polido e 33,10% de arroz esbrançado no período de março a maio de 2007 (CONAB, 2007).

Para safra 2007/2008 a área cultivada com arroz está estimada em 2,97 milhões de hectares, 0,4% (11,2 mil hectares) superior à safra de 2007/2006. Este crescimento deve-se ao fato do Rio Grande do Sul retomar áreas não cultivadas. Na região Centro-Oeste e Sudeste, houve uma diminuição nas áreas plantadas na ordem de 14,3 e 11,5%, respectivamente. Este fato ocorreu devido ao aumento do plantio do milho e da soja que, em virtude do preço do mercado se tornaram mais atrativos ao produtor. Quanto as condições climáticas, favoreceram o desenvolvimento das lavouras, o que eleva a estimativa de produção, principalmente, das regiões mais representativas para cultura do arroz nas regiões Sul e Nordeste. O bom nível dos mananciais e a insolação têm beneficiado o desenvolvimento da cultura no Rio Grande do Sul, onde já há 3% de área colhida e 15% de grãos maduros e prontos para serem colhidos. Estima-se para esta safra uma produção de 12,0 milhões de toneladas, 6,7% (754,1 mil toneladas) superior à safra anterior. Desse total, a Região Sul corresponde à 69,4% (8,37 milhões de toneladas), com destaque para o Rio Grande do Sul, que participa com 85,0% (7,1 milhões de toneladas) da produção regional (CONAB, 2008).

2.1.4 Arroz-vermelho

Pereira e Ramos (2004) pesquisaram sobre o arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.) e verificaram que este é uma cultura tradicionalmente plantada no Brasil, na Argentina, na Venezuela, no Madagascar, Moçambique, Sri Lanka, Índia, Nepal, Butão, Japão e Coreia do Sul, dentre outros países. Existem atualmente catalogadas 23 espécies pertencentes ao gênero *Oryza* L. entre as quais apenas duas são cultivadas, mas todas elas podem apresentar os grãos com o pericarpo vermelho. As espécies cultivadas são *Oryza glaberrima* Steud. e *Oryza sativa* L. A primeira é originária do oeste da África e ficou praticamente restrita àquele Continente, enquanto a segunda tem o seu centro de origem no sudeste asiático e é atualmente plantada em mais de uma centena de países. Além de possuir grãos vermelhos, a espécie *Oryza sativa* L. apresenta grãos brancos, aliás, o tipo que terminou predominando universalmente.

2.1.4.1 Histórico

A espécie *Oryza sativa* L. veio do oriente para a cidade de Veneza, na Itália, pela rota das especiarias depois do século XV. Dessa forma o arroz-vermelho também chegou a Portugal que contribuiu para sua vinda ao Brasil. As primeiras sementes foram introduzidas na Capitania do Maranhão no século XVII pelos colonos oriundos dos Arquipélagos dos Açores. O arroz disseminou-se pela região norte do Brasil entre os lavradores que passaram a denominá-lo de arroz-vermelho, arroz-da-terra ou arroz-de-Veneza. Porém o comércio no século XVIII apenas havia interesse pelo arroz branco, desse modo, o arroz-vermelho foi proibido de ser cultivado no Maranhão – apesar da preferência deste pela população nativa. A partir de então o arroz-vermelho passou a ser explorado em regiões semi-áridas pouco favoráveis para produção (PEREIRA e RAMOS, 2004).

No Brasil, o arroz-vermelho é plantado principalmente nos Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Ceará, Bahia e também no estado de Minas Gerais. A sua produção está relacionado ao hábito alimentar da população regional. O arroz-vermelho também se encontra em extinção devido a forte concorrência da indústria do arroz branco (PEREIRA e RAMOS, 2004).

Temudo (1996) verificou algumas razões para o abandono de variedades cultivadas e experimentais do arroz-vermelho pelos produtores na região sul de Guiné – Bissau. São eles: dificuldade durante a colheita devido a altura do caule e o desprendimento do grão, a pequena capacidade de inchamento do grão durante o cozimento, a cor intensa do pericarpo e o excesso de sabor.

Devido à concorrência, em outros estados no Brasil, o arroz-vermelho é considerado erva daninha entre a cultura do arroz branco. O arroz-vermelho cultivado no Nordeste pertence à mesma espécie do arroz-vermelho planta invasora (*Oryza sativa*). A diferença é que, botanicamente, um

existe já na forma cultivada, enquanto o outro é uma forma espontânea. Ou seja, enquanto o cultivado vem sendo submetido a um longo processo de seleção, o espontâneo, continua uma planta silvestre (PLANETA ARROZ, 2005).

Para Marchezan et al. (2001) a presença de arroz-vermelho nas áreas de produção de arroz irrigado é vista como o principal entrave à elevação do rendimento do arroz. Agostineto et al. (2002) investigaram a supressão de sementes viáveis arroz-vermelho para reduzir o seu banco de sementes no solo nas culturas de arroz irrigado. Concluíram que os herbicidas glyphosate, glufosinate e paraquat podem ser usados seletivamente para suprimir a produção de sementes de arroz-vermelho, quando aplicados na fase de maturação do arroz irrigado. A adoção desta tecnologia depende de haver diferença de ciclo do arroz-vermelho em relação ao arroz branco cultivado, pela utilização de cultivares de arroz de ciclo precoce ou super precoce.

Santos et al. (2002), nos seus estudos para recomendações técnicas de arroz irrigado em Tocantins verificaram que a semeadura realizada diretamente no solo sobre cobertura vegetal previamente dessecada com herbicida e sem revolvimento reduz consideravelmente a incidência de arroz-vermelho como erva daninha.

2.1.4.2 A Preservação e Pesquisa do Arroz-vermelho

A importância da preservação da variabilidade genética do arroz-vermelho, para manter a qualidade do alimento e promover seu melhoramento genético, é alvo de preocupação de muitos pesquisadores. Infelizmente, a tendência aponta para a extinção do arroz-vermelho. E a falta de pesquisas nessa área pode contribuir para o desaparecimento de vários genes de interesse importantes para a segurança alimentar das famílias nordestinas (PLANETA ARROZ, 2005).

Pereira e Ramos (2004) verificaram que as 23 espécies de arroz catalogadas pela pesquisa no mundo inteiro são vermelhas. Só no caso da *Oryza sativa* houve mutação e surgiu o arroz branco.

Fonseca et al. (2006) trabalharam com resgate do arroz - vermelho nos estados da Paraíba e do Ceará, para isso contaram com o programa nacional de coleta de germoplasma de arroz colaborada por empresas públicas e privadas de pesquisas. Consistiu, portanto, na coleta do cereal e uso imediato deste para programas de melhoramento genético e para apresentar informações, em especial a comunidade científica sobre o germoplasma do arroz-vermelho coletado nas regiões do Maranhão, Piauí, Roraima, Amazonas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Goiás, Espírito Santo, Minas Gerais e Santa Catarina, Paraíba e Ceará.

Pereira e Ramos (2004) procuram contribuir para a redução da erosão genética deste cereal e aumentar a segurança alimentar das populações no Nordeste do Brasil, além de estar preservando uma tradição fortemente arraigada em considerável parcela do povo da região Norte e Nordeste.

2.2 PROCESSOS DE SECAGEM E ARMAZENAMENTO

A secagem é uma das etapas do processamento dos produtos agrícolas que tem a finalidade de retirar parte da água contida no produto afim de conservar sua qualidade. É definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. A remoção da água deve ocorrer de forma que a umidade do produto fique em equilíbrio com o a umidade relativa do ambiente onde é armazenado, mantendo sua aparência, suas qualidades nutritivas para os grãos e a também a viabilidade no caso de sementes (SILVA et al., 2000b).

A utilização da secagem é o processo comercial mais utilizado para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas devido ao seu custo mais baixo do que outros métodos de conservação de produtos agrícolas. A remoção de água após a maturação fisiológica do produto possibilita que este possa ser armazenado em condições ambientais por longos períodos, normalmente maiores que 3 anos, sem as perdas de suas propriedades nutricionais e organolépticas. Tal efeito é conseguido pela criação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microorganismos no produto.

Rossi e Roa (1980) mostraram que além do armazenamento, a secagem é também importante por outros motivos:

- a) Permite antecipar a colheita, do que manter o produto secando na própria planta, sujeita a diminuição de perdas ocasionadas por insetos, pássaros, roedores e condições climáticas adversas.
- b) Proporciona ao produtor uma tomada de preços mais altos durante a entressafra, quando esse associa o armazenamento ao processo da secagem, bem como as instituições governamentais a manter estoques reguladores de mercado.
- c) Beneficia a viabilidade da semente. Ao reduzir seu teor de água, proporciona a diminuição da taxa respiratória e outras reações que limitam o desenvolvimento de microorganismos. Assim a germinação é mantida por longos períodos.

A operação da secagem torna-se uma das etapas de extrema importância no processamento e comercialização do arroz. Os arrozes provenientes de lavouras (principalmente de lavouras irrigadas) são colhidos com altos teores de água em condições ambientais de elevadas temperaturas e umidade relativa. Isso torna a secagem uma operação indispensável, que, em geral, constitui-se num ponto de estrangulamento para o beneficiamento de grãos e sementes (MOTTA et al., 1999).

Para que ocorra a secagem de grãos, é preciso considerar a interação entre as propriedades do ar e do produto. Sabe-se que os grãos de arroz são higroscópicos, ou seja, absorvem ou perdem umidade para o ambiente conforme as condições de temperatura e umidade relativa do ar ao seu redor. A água presente nos grãos ou sementes é encontrada em três condições: Água de constituição, que está unida quimicamente ao produto e não é retirada pela secagem; água absorvida, que é atraída para a superfície do produto por forças de atração entre moléculas de água

e moléculas do produto; e a água livre, que é a água retida nos espaços intercelulares ou entre os poros do produto, facilmente retirada pela secagem.

A secagem do arroz tem por objetivo reduzir a umidade até próximo de 13%, preservando assim a qualidade fisiológica dos grãos. O processo de secagem pode ser efetuado pelo método natural, em terreiros, ou artificialmente pelo uso de secadores estacionários, contínuos ou intermitentes com temperaturas de secagem que variam de acordo com o tempo de exposição do produto e equipamento. E durante a secagem é indispensável o uso da carta psicrométrica, que mostra as propriedades do ar e suas relações dentro de determinadas condições climáticas e do higrômetro, utilizado para medir a umidade relativa do ar (SANTOS et al., 2006).

Na secagem de sementes de arroz, por exemplo, utiliza-se o método intermitente, por meio de secadores intermitentes ou contínuos, sendo que estes apresentam, no mínimo, duas câmaras, uma de secagem e outra de resfriamento, e são adaptados para operar com o fluxo de grãos ou sementes por gravidade. Neste método é indicada a temperatura do ar que atravessa a câmara de secagem, em geral, não superior a 70°C. A passagem das sementes ocorre diversas vezes pelo conjunto secador elevador e constitui-se numa opção capaz de reduzir custos operacionais, pela possibilidade de diminuir o tempo de secagem e a energia consumida, o possibilita realizar a operação de secagem em tempo reduzido, no entanto são necessários tomar precauções contra perdas e danos às sementes.

Em experimentos com a secagem de arroz, Rosa (1966), Luz e Peske (1988) e Santos et al. (2006) determinaram que as temperaturas de secagem superiores a 70 °C podem provocar fissuras nas sementes de arroz, ocasionando sua inviabilidade. Portanto, recomenda-se utilizar temperaturas não superiores a 70 °C. Verificaram, ainda, a secagem a baixas temperaturas proporcionam processos de secagens mais lentos e permitem ocasionar perdas da qualidade fisiológica dos produtos por favorecer o desenvolvimento de fungos que encontram condições ideais de proliferação.

O armazenamento é uma etapa pós-colheita do sistema produtivo, cujo objetivo principal é o de preservar a viabilidade e o vigor da semente destinada ao plantio e a qualidade do grão para o consumo ou processamento industrial. No armazenamento, existem muitos fatores bióticos e abióticos que interferem na qualidade de um produto armazenado e entre estes fatores, a umidade e temperatura são as variáveis mais importantes no monitoramento e controle da qualidade do produto armazenado (SANTOS et al., 2006).

Para a correta condução das operações de secagem e armazenagem de um produto torna-se necessário o conhecimento das relações existentes entre a temperatura e a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação do produto o que é determinado por meio da umidade de equilíbrio (OZTEKIN et al., 1999).

2.3 UMIDADE DE EQUILÍBRIO E ISOTERMAS DE SORÇÃO

Produtos agrícolas desidratados, em contato com ar, em condições de temperatura e umidades relativas constantes, adsorvem umidade do meio alcançando uma concentração de umidade conhecida como umidade de equilíbrio. No entanto, produtos hidratados nessas mesmas condições, desorvem umidade para o meio até atingir a umidade de equilíbrio. Em outras palavras, a umidade de equilíbrio ocorre quando a umidade do produto se mantém, o produto não ganha e não perde água do ambiente. Em geral, o termo “sorção” é designado ao fenômeno de adsorção e dessorção de água que têm lugar em uma matéria quando submetida a um ambiente de temperatura e umidade relativa controlada através de um processo de secagem ou de re-hidratação (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura, é definida como a umidade deste, correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no meio ambiente. Esta variável determina a umidade mínima que o material pode atingir para um determinado conjunto de condições operacionais tendo o seu valor de fundamental importância na modelagem do processo de secagem. As condições do ar na secagem com ar ambiente não são constantes, o que torna a determinação das isotermas de equilíbrio indispensável à avaliação da interação do sólido com o vapor d'água presente no ar de secagem (LEHN e PINTO, 2004).

O conhecimento e a compreensão das isotermas de sorção dos alimentos são de grande importância na área de tecnologia e de ciência dos alimentos para a resolução de muitos problemas, tais como: avaliação e caracterização das ligações da água; análise do calor de sorção; otimização do processamento, como, por exemplo, nos processos de secagem e armazenamento, avaliação de problemas de estocagem e embalagem, na estimativa da estabilidade microbiana, química e física dos alimentos, entre outros (DITCHFIELD, 2000). As isotermas são importantes para definir os limites de desidratação do produto, bem como estimar as mudanças de teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e definir os teores de água adequados ao início de atividade de microorganismos, que podem provocar deterioração do produto. E além de determinar o requerimento de energia necessário ao processo de secagem, o que representa os valores de calor isostérico de sorção (RESENDE et al., 2006a).

De acordo com Ditchfield (2000) a isoterma dos produtos agrícolas divide-se em várias regiões, segundo a quantidade de água presente. Na Figura 1, podem ser observadas três regiões: Região A, que corresponde à adsorção da camada monomolecular de água; Região B, onde ocorre a adsorção de camadas adicionais sobre a monocamada, e a região C que corresponde à condensação da água nos poros do produto seguida pela dissolução do material solúvel presente.

Na Figura 1 é mostrado, também, o fenômeno da histerese. Observa-se que o teor de água de equilíbrio é diferente quando os grãos ganham água (adsorção) e quando perdem água (dessorção). A velocidade de adsorção de água pelo grão é menor que a de dessorção, o que faz com que ocorra o fenômeno de histerese entre a curva de secagem e o reumidecimento do produto, de modo que, o caminho de um produto quando perde água é diferente quando o mesmo ganha

água. Tal fenômeno ocorre devido às propriedades físicas da água com os capilares da estrutura dos grãos (SILVA et al., 2000a; ALONSO, 2001; ITO, 2003).

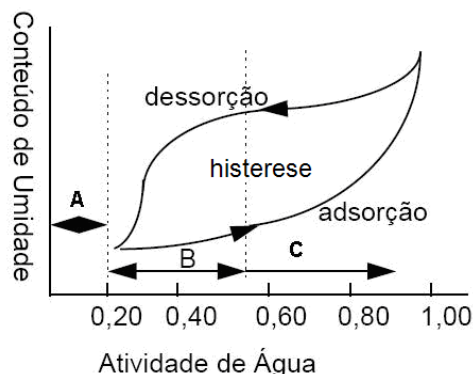


FIGURA 1. Isoterma genérica de adsorção e dessorção citado por Ditchfield (2000)

2.3.1 Atividade de Água

A água disponível no alimento que pode ser retirada pelo processo de secagem é denominada como a atividade de água (A_w). É a responsável pelo crescimento microbiano e reações que possam deteriorar o alimento.

O grau de disponibilidade de água livre no alimento, expresso como atividade de água (A_w), define-se como a relação entre a pressão de vapor da água no alimento (P) em pascal e a pressão de vapor da água pura (P_0) em pascal numa mesma temperatura, conforme mostra a Equação 1.

$$A_w = \frac{P(pa)}{P_0(pa)} \quad (1)$$

em que,

A_w - atividade de água, adimensional;

P - pressão de vapor da água no alimento, pa;

P_0 - pressão de vapor da água pura, pa.

Quando um alimento está em equilíbrio com o ambiente, há uma igualdade entre a atividade de água (A_w) do produto agrícola ou de uma solução e a umidade relativa (UR) exercida pela solução ou por alimento em um ambiente isolado, como pode ser visto na Equação 2 (COULTATE, 1996).

$$A_w = \frac{UR(\%)}{100} \quad (2)$$

em que,

A_w - atividade de água, adimensional;

UR - umidade relativa, %.

Para Rockland e Beuchat (1987), essa relação entre A_w e UR permite prever quanto os alimentos poderão ganhar ou perder umidade quando forem expostos a um ar de determinada umidade relativa e temperatura. Portanto, o uso da atividade de água tem sido indispensável para garantir a estabilidade dos alimentos e controlar o crescimento de microorganismos deterioradores e causadores de intoxicação e infecção alimentar. O principal fator na estabilidade de um alimento não é, portanto, o teor de água, mas sim a disponibilidade da água para o crescimento de microorganismos e reações químicas (DITCHFIELD, 2000).

2.3.2 Tipos de isotermas

As isotermas de sorção apresentam diferentes formas. Brunauer et al. (1938) classificaram as isotermas de sorção (classificação de Brunauer-Emmett-Teller, BET) em cinco tipos gerais vistos pela Figura 2. As isotermas de sorção do tipo I e do tipo II são chamadas isotermas de Langmuir e sigmoidal ou de estrutura em S, respectivamente. Nenhum nome específico foi dado para os demais tipos de isotermas de sorção. Os tipos II e III têm uma estreita relação com os tipos IV e V, com a exceção que a máxima adsorção ocorre em pressões abaixo da pressão de vapor de água do meio.

A Figura 2 mostra isotermas de sorção obtidas experimentalmente de substâncias que produzem isotermas de diferentes formas. São isotermas de adsorção obtidas através de um processo de umidificação de amostras previamente dessecadas. As isotermas de forma sigmoidal são características de muitos alimentos tais como materiais protéicos ou farináceos como farinha de trigo, amidos e amidos modificados (ASCHERI et al., 2005). No entanto, alimentos tais como frutas, produtos de confeitaria e café solúvel, de elevado teor de açúcares e outras moléculas solúveis de baixo peso molecular e pobre em polímeros de alto peso molecular, exibem isotermas de sorção do tipo I (CHETANA et al., 2005).

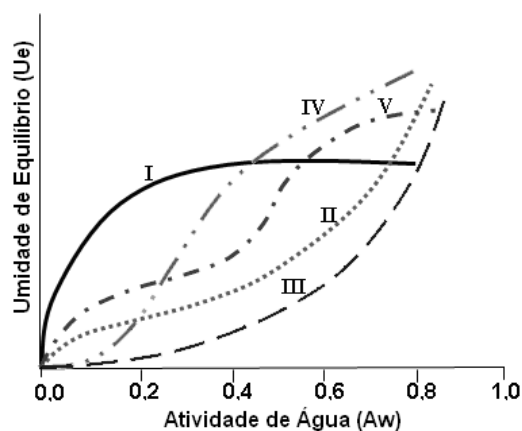


FIGURA 2. Os cinco Tipos de isotermas de sorção segundo (BRUNAUER et al., 1938).

2.3.3 As Isotermas do tipo II

Muitos pesquisadores delimitam, pelo menos, duas seções ou regiões diferentes das isotermas de sorção de água dos alimentos.

A Figura 3 mostra uma isoterma de sorção genérica para faixas de baixa umidade de um alimento. A curva tem forma sigmoidal ou apresenta uma estrutura em forma de S, portanto, classificada como isoterma de sorção de água do tipo II segundo a classificação de BET (BRUNAUER et al., 1938).

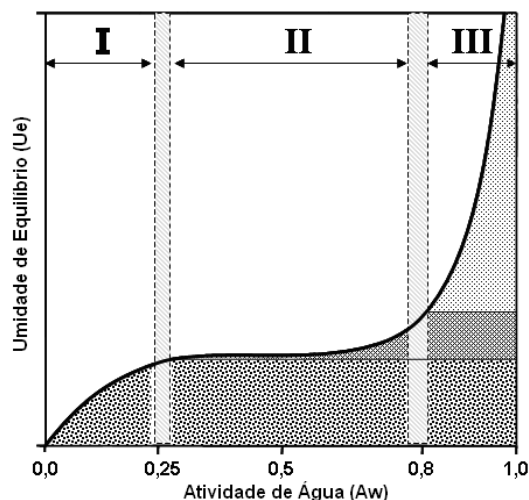


FIGURA 3. Representação esquemática de uma isoterma de adsorção de água para faixas de baixa umidade de um alimento (20 °C) (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

Nesta curva evidenciam-se três regiões bem diferenciadas onde as propriedades da água de adsorção do alimento desidratado adsorvido através de um processo de umidificação a partir da região I (região de baixa umidade) até a região III (região de alta umidade), diferem consideravelmente. Os principais atributos da água adsorvida em cada região se descrevem a seguir.

a) Em valores de atividade de água inferiores a 0,25 correspondentes à região I da Figura 3, atinge-se a região de adsorção primária, onde as moléculas de água podem estar ligadas a grupos polares ou sítios ativos ou sítios específicos (Grupos NH_3^+ e COO^- das proteínas e grupos OH^- dos amidos e provavelmente, também água de cristalização dos sais e açúcares) por interações água-íon ou água-dipolo; e por sua vez liga-se a outras moléculas de água por pontes de hidrogênio. Rockland e Beuchat (1987) mostram que a relação da atividade de água e a umidade de equilíbrio podem alterar as propriedades físicas do alimento. No caso da região 1 (Figura 3) a maioria dos alimentos se encontra com baixa umidade, seco duro, crocante e enrugado.

b) A água da região II da Figura 3 constituiu-se da água contida na região I mais a água adicionada durante o processo de umidificação confinada dentro da região II. A água adicionada na região II ocupa os sítios ativos que restam na monocamada e várias camadas

adicionais em torno dos grupos hidrofílicos da matéria seca, chamada de multicamada. A água da multicamada se associa com as moléculas vizinhas primariamente por pontes de hidrogênio água-água e água-soluto. A entalpia de vaporização da água na multicamada é ligeira e moderadamente maior que a da água pura, dependendo da proximidade da água aos constituintes não aquosos, não congelando a maior parte desta água a acima de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na região II os alimentos mantêm a característica de seco, firme e ainda flexível (ROCKLAND e BEUCHAT, 1987).

c) E na região III da Figura 3 a água constitui a soma do conteúdo de água da região I e II mais a água adicionada durante o processo de umidificação dentro da região III. A água adicionada na região III é a água livre (menos fortemente ligada e mais móvel molecularmente) dos alimentos e se designa água da fase aquosa. Os alimentos tornam-se mais úmidos, macios, flácidos, inchados e grudentos (DICHTFIELD, 2000)

Rockland e Beuchat (1987), mostram que os limites que separam as regiões da isoterma da Figura 3 não podem estabelecer-se com exatidão e que a água, com a possível exceção da água de constituição, pode migrar dentro e entre regiões. Ainda, embora a adição de água a um material seco possa alterar as propriedades da água que já está presente (processo de dissolução e inchamento da matéria) por conceito é útil considerar que a água da região I permaneça quase constante ao adicionar a água da região II e que a água da região II permaneça quase constante ao adicionar a água da região III.

2.3.4 Determinação das isotermas

Segundo Rossi e Roa (1980), para determinação das isotermas utilizam-se três métodos convencionais: soluções aquosas saturadas de diferentes sais, soluções aquosas de diferentes concentrações de ácidos e métodos mecânicos. Os métodos que envolvem soluções aquosas, obtêm-se diferentes valores de umidade relativa do ar, acima da superfície das soluções, contidas em recipientes herméticos. A temperatura do ar é controlada numa estufa ou câmara refrigerada. Para cada amostra coloca-se de 30 a 50 g do produto em peneiras de arame, acima das superfícies das soluções, pesando-as, periodicamente, em balança analítica, até que não haja mais variação de peso. Nesta situação determina-se o teor de água da amostra em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa interna ao frasco hermético no qual permaneceu armazenada. Dependendo do produto o tempo em que este demora a atingir o equilíbrio pode se prolongar por 1 a 2 meses. Quanto aos métodos mecânicos, consistem em movimentar o ar, com condições de umidade e temperatura controladas, através do produto, até que se atinja o equilíbrio. As condições controladas de umidade relativa e temperatura são obtidas por meio da pulverização de água, vaporização de água por meio de resistências elétricas ou injeção direta de vapor.

Silva et al. (2000a), mostraram que a determinação da umidade de equilíbrio é feita pela manutenção do produto pelo ambiente (uma massa de ar) cujas características psicrométricas são

conhecidas ou pré-estabelecidas. E nomeou os métodos de determinação de umidade de equilíbrio citados por ROSSI e ROA (1980) por método estático (em que o ar e o produto não sofrem movimentação) e o método dinâmico (em que o ar ou produto são movimentados mecanicamente para acelerar o equilíbrio).

2.3.4.1 Método estático

Barrozo (1998) utilizou soluções aquosas saturadas de vários sais ou de diferentes concentrações de ácido, onde se obtém diferentes valores de umidade relativa do ar, acima da superfície das soluções, contidas em recipientes herméticos. A temperatura do ar é controlada colocando-se os frascos em uma estufa ou câmara refrigerada. Para cada amostra colocam-se de 30 a 50g do produto sobre recipientes, que ficam suspensas acima das superfícies das soluções. Estas são pesadas periodicamente em balança de precisão, até que não haja mais variação de peso.

O teor de água da amostra em equilíbrio com as condições de temperatura e umidade relativa internas ao frasco hermético pode ser obtido pelo método da estufa (BRASIL, 1992). O tempo para atingir o equilíbrio pode se prolongar por mais de 21 dias no caso de grãos (BARROZO, 1998), por três a quatro meses para café em coco e por sete dias no caso de partículas de alumina (ALMEIDA et al., 2002). O uso das soluções salinas é mais comum devido à segurança no manuseio e pela facilidade de se manter a umidade relativa constante, que é uma das vantagens deste método.

2.3.4.1.1 Soluções salinas saturadas

A Tabela 5 apresenta os valores da umidade relativa obtidas em frascos herméticos contendo soluções saturadas de alguns dos principais sais utilizados, em função da temperatura ROSSI e ROA (1980). Verifica-se que a atividade de água dos sais ou a umidade relativa em decimal dos sais reduzem com o aumento da temperatura devido o aumento da solubilidade dos sais pelo aquecimento da solução.

TABELA 5 – Umidade relativa de soluções saturadas de sais a diferentes temperaturas.

Sal	Umidade relativa (em decimal) à temperatura (°C) de:						
	5	10	20	25	30	40	50
LiCl (cloreto de lítio)	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,112	0,111
MgCl ₂ ·6H ₂ O (cloreto de hexahidratado)	0,336	0,335	0,331	0,328	0,324	0,316	0,305
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (nitrato de hexahidratado)	0,589	0,574	0,544	0,529	0,514	0,484	0,454
NaCl (cloreto de sódio)	0,757	0,757	0,755	0,753	0,751	0,747	0,744
KCl (cloreto de potássio)	0,877	0,868	0,851	0,843	0,836	0,823	0,812
K ₂ SO ₄ (sulfato de potássio)	0,985	0,982	0,976	0,973	0,970	0,964	0,958

Fonte: ROSSI e ROA, 1980; RIZVI, 1987.

Para obtenção da umidade relativa por soluções salinas saturadas, ROSSI e ROA (1980) e Ditchfield (2000) demonstram a quantidade de sal (g) para uma determinada quantidade de água (mL) como se encontra na Tabela 6.

TABELA 6 – Quantidades de sal (g) e de água para se obter a umidade relativa (UR) .

Sal	UR (decimal)	Quantidade	
		Sal (g)	Água (mL)
LiCl	0,111	150	85
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0,323	200	25
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0,525	200	30
NaCl	0,752	200	60
KCl	0,837	200	80
K ₂ SO ₄	0,973	200	100

Fonte: ROSSI e ROA, 1980; DITCHFIELD, 2000.

Os valores encontrados nas Tabelas 5 e 6 são muito utilizados e até extrapolados para diversas temperaturas. Porém devido a incertezas ocasionadas por procedimentos incorretos e equipamentos inadequados, Labuza et al. (1985) determinaram a umidade relativa de soluções salinas saturadas e, por meio de seus resultados obtiveram equações que descrevem a atividade de água em função da temperatura para oito sais em estudo. O uso das equações permitem fornecer valores mais precisos e são apresentadas na Tabela 7. Para o método estático ou dinâmico em soluções aquosas, cada sal possui uma equação que por meio da temperatura absoluta (T) em um recipiente hermético pode-se pré-dizer a umidade relativa (UR). Ascheri et al. (2005), também utilizaram em seu trabalho as equações de Labuza et al. (1985) para soluções saturadas a 30°C

TABELA 7 – Equações de regressão linear de sais para predição de atividade de água

Sal	Equação de regressão Linear	R ²	Equação
LiCl	$Ln(UR) = \frac{500,95}{T} - 3,85$	0,976	(3)
MgCl ₂	$Ln(UR) = \frac{303,35}{T} - 2,13$	0,995	(4)
Mg(NO ₃) ₂	$Ln(UR) = \frac{356,60}{T} - 1,82$	0,987	(5)
NaCl	$Ln(UR) = \frac{228,92}{T} - 1,04$	0,961	(6)
KCL	$Ln(UR) = \frac{367,58}{T} - 1,39$	0,967	(7)
K ₂ SO ₄	$Ln(UR) = \frac{55,26}{T} - 0,21$	0,985	(8)

Fonte: LABUZA et al. 1985.

em que,

T - temperatura absoluta, K;

UR - umidade relativa em decimal. E para este caso a umidade relativa no interior do recipiente hermético.

Grisi (2002) também afirmou que a temperatura depende do sal da solução saturada para a influencia da umidade relativa no ambiente. Na Tabela 6 pode-se verificar as equações apresentadas pelo pesquisador.

TABELA 8 – Equações para predição de atividade de água de diferentes sais

Sal	Equação de regressão Linear	P (decimal)	Equação
LiCl	$UR = \exp\left(\frac{10,8233}{T} - 2,9193\right)$	0,976	(9)
MgCl ₂	$UR = \exp\left(\frac{151,0652}{T} - 1,6271\right)$	0,4059	(10)
Mg(NO ₃) ₂	$UR = \exp\left(\frac{84,6993}{T} - 2,2670\right)$	0,3413	(11)
NaCl	$UR = \exp\left(\frac{23,1092}{T} - 0,3607\right)$	0,1631	(12)
KCL	$UR = \exp\left(\frac{157,0587}{T} - 0,6967\right)$	0,0289	(13)

Fonte: GRISI, 2002.

em que,

T - temperatura absoluta, K;

UR - umidade relativa, decimal; E para este caso a umidade relativa no interior do recipiente hermético.

P - erro relativo, adimensional.

2.3.4.2 Método dinâmico

Consiste em percolar o ar com condições de umidade e temperatura controladas através da amostra de grãos, até que o grão e o ar atinjam o equilíbrio. As condições controladas de umidade relativa e temperatura são obtidas por meio de pulverização de água, vaporização de água por meio de resistências elétricas, injeção direta de vapor ou alimentação de duas correntes, uma com ar saturado e outra com ar ambiente, regulando as vazões de forma a se obter a umidade do ar desejada. Neste método, a velocidade com que a umidade do grão caminha para o equilíbrio é maior quando comparado com o método anterior. Para alguns grãos, o tempo médio é de 5 h, sendo esta a vantagem deste método quando comparado com o método estático (BARROZO, 1998).

2.3.4.3 Modelos matemáticos para prever a umidade de equilíbrio

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários pesquisadores, que descrevem modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Para o estabelecimento de isotermas que representam esta relação de equilíbrio, entretanto, são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico disponível tem sido capaz de prever, com precisão, o teor de água e umidade relativa do ar (RESENDE et al., 2006a).

Na literatura são encontradas mais de 200 equações propostas para representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas. Estes modelos diferem tanto em sua base teórica ou empírica quanto na quantidade de parâmetros envolvidos (MULET et al. 2002).

As equações teóricas são baseadas nas conhecidas teorias cinéticas de adsorção de Kelvin, Langmuir e BET (Brunauer, Emmett e Teller) (LEHN e PINTO, 2004).

Entre os diversos modelos utilizados, BET (Equação 14) considera a natureza química da umidade do produto para camadas polimoleculares de produtos agrícolas (SILVA et al., 2007).

$$U_e = \left(\frac{(X_m \cdot c \cdot UR) \cdot (1 - (n + 1) \cdot UR^n + n \cdot UR^{n+1})}{(1 - UR) \cdot (1 + (c - 1) \cdot UR - c \cdot UR^{n+1})} \right) \quad (14)$$

em que,

U_e – conteúdo de umidade de equilíbrio, kg.kg⁻¹;

X_m – conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg.kg⁻¹;

UR – umidade relativa, decimal;

c e n – parâmetros que dependem do material analisado.

Relacionar a dependência das isotermas com a temperatura, Chen, citado por Corrêa et AL. (2001), obteve a Equação 15. Kouhila et al. (2001), Corrêa et al. (2001), Corrêa et al. (2002), assim como muitos outros pesquisadores vêm utilizando o modelo de Chen Clayton para ajuste e representar o fenômeno higroscópico de grãos, frutas, plantas medicinais e alimentos de origem animal.

$$Ue = \frac{-1}{c \cdot T^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-a \cdot T^b} \right] \quad (15)$$

em que,

T – temperatura em °C;

a, b, c e d – são parâmetros que dependem do material analisado.

O modelo de Chung Pfost foi apresentado no trabalho de Pfost em 1976 como uma equação que permitisse estimar, com determinada precisão, os valores de umidade de equilíbrio de grãos e cereais na faixa de 20 a 90% de umidade relativa (ALMEIDA et al., 1999; CORDEIRO et al., 2006). Esta equação é apresentada pela Equação 16 da seguinte forma.

$$Ue = -\frac{1}{b} \ln \left[\frac{(T + c) \ln(UR)}{-a} \right] \quad (16)$$

Banaszek e Siebenmorgen (1990b) apresentaram o modelo de Chung Pfost Modificado como o mais adequado para se ajustar com melhor precisão ao arroz com casca. Chung Pfost Modificado, apresentado pela Equação 17, vem sendo utilizado por muitos autores para representar o equilíbrio higroscópico de cereais como Corrêa et al. (2006), Resende et al. (2006b), Goneli et al. (2007) e Toneli et al. (2007).

$$Ue = a - b \ln[-(T + c) \cdot \ln(UR)] \quad (17)$$

Entre outras equações menos difundidas, tem-se a equação de Copace (Equação 18). Utilizada por Araújo et al. (2001), demonstrou eficiência em seus experimentos com atividade de água inferior a 0,20.

$$Ue = \exp^{(a-b \cdot T - c \cdot UR)} \quad (18)$$

Guggenheim, Anderson e de Bøer estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação triparmétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9. A equação de GAB é escrita conforme a Equação 19 (SILVA et al. 2007).

$$Ue = \left(\frac{Xm.c.k.UR}{(1-k.UR).(1-k.UR+c.k.UR)} \right) \quad (19)$$

em que,

Xm – conteúdo de umidade na monocamada molecular, kg.kg-1;

c – parâmetro que depende do material analisado.

k – constante de adsorção.

O modelo de Oswin baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. É um modelo empírico, definido como apresenta a Equação 20 (SILVA et al., 2007).

$$Ue = a \cdot \left(\frac{UR}{1-UR} \right)^b \quad (20)$$

Para expressar o modelo de Oswin em função da temperatura foram necessários realizar ajustes até estabelecer o modelo de Oswin Modificado (Equação 20) em função da temperatura mantendo a expansão matemática para uma curva sigmoidal (CHEN e MOREY, 1989; JAYAS e MAZZA, 1993; CORRÊA et al., 2005).

$$Ue = (a + b * T) * \left[\frac{UR}{1-UR} \right]^{1/c} \quad (21)$$

Cavalcanti Mata (1997), mostrou os estudos de Smith em 1947 que desenvolveu a equação 22, que se ajusta bem aos dados experimentais de umidade de equilíbrio de cereais para condições reais para condições de umidade relativa de 50 a 95%. Gomes et al. (2002); Silva et al. (2002) e Araújo et al. (2001) também utilizaram este modelo para ajuste aos dados experimentais de plantas medicinais e sementes.

$$Ue = a - (b * T) - c * \ln(1-UR) \quad (22)$$

As outras equações utilizadas na literatura para estimativa da umidade de equilíbrio de cereais encontram-se agrupadas na Tabela 9.

TABELA 9 – Modelos matemáticos para determinação de umidade de equilíbrio

Nome	Equação	Referencia	Equação
Henderson Modificado	$Ue = \left[\frac{\ln(1-UR)}{-a(T+c)} \right]^{1/c}$	Kouhila et al. (2001)	(22)
Henderson	$Ue = \left[\frac{\ln(1-UR)}{(-a \cdot T_{abs})} \right]^{\left(\frac{1}{b}\right)}$	Matos et al. (1998)	(23)
Halsey Modificada	$Ue = \left[\frac{-\exp(a \cdot T + c)}{\ln(UR)} \right]^{\left(\frac{1}{b}\right)}$	Corrêa et al. (2005)	(24)
Sigma Copace	$Ue = e^{(a-b \cdot T + c \cdot e^{UR})}$	Matos et al. (1998)	(25)
Halsey	$Ue = \exp(a + bTs) [-\ln(UR)]^{1/c}$	Lehn e Pinto (2004)	(26)

A partir destas equações e das metodologias são traçadas as curvas de isotermas como mostrado na Figura 1. A relação entre a umidade de determinado produto e a correspondente umidade relativa de equilíbrio, para uma dada temperatura, pode ser expressa por meio dessas curvas. Os valores estão denominados para cada temperatura específica.

2.3.5 Pesquisas relacionadas a isotermas de arroz

Banaszek e Siebenmorgen (1990a) determinaram as curvas de adsorção do arroz natural (em casca) partindo de uma umidade inicial entre 0,9 a 0,15 (base seca) para encontrar o melhor modelo que se ajuste aos dados experimentais em função de várias temperaturas e umidades relativas. O experimento foi realizado na Universidade de Arkansas onde também foi cultivado e colhido o arroz para amostragem. Para o experimento de adsorção, inicialmente, o arroz natural foi submetido a secagem em uma câmara suprida com ar em, aproximadamente, 20 °C com a umidade relativa regulada entre 9 a 15%. Depois de secas, as amostras de arroz eram colocadas em sacos plásticos vedados e armazenadas a 1 °C até o momento do experimento de adsorção. Utilizando o método dinâmico, as amostras (450 g) foram colocadas em recipientes dentro de uma câmara condicionadora de temperatura e umidade relativa construída para manter dezesseis amostras submetidas a um fluxo de ar constante. As amostras foram submetidas as temperaturas de 12,5; 20 e 30 °C e umidades relativas entre 70 a 90%. A pesagem das amostras foi realizada obedecendo a um critério de intervalos em 1, 2, 4, 8, 16 até 168 horas até o produto entrar em equilíbrio. Para o ajuste aos dados experimentais foram utilizados modelos matemáticos pesquisados por Henderson e Perry para adaptar a umidade inicial ao modelo. E tomando em consideração ao erro médio estimado (SE) verificaram que a equação 27 melhor se adequou aos dados experimentais em função do tempo.

$$MR = \exp(-K \cdot t^n) \quad (27)$$

$$K = e \cdot IMC + g \cdot T + h$$

em que,

MR = Umidade relativa,

K= coeficiente de regressão,

t = tempo,

IMC = Umidade de Equilíbrio Inicial,

T= Temperatura, °C,

e, n, g, h= coeficientes de regressão adimensional.

Os autores verificaram que o aumento da umidade de equilíbrio inicial reduz a taxa de adsorção para todas as condições de umidade relativa e temperaturas estudadas.

Em outro trabalho Banaszek e Siebenmorgen (1990b), semelhante o mesmo procedimento realizado na pesquisa anterior, determinaram as isotermas de adsorção do arroz longo em casca sujeito as temperaturas de 12,5, 15, 20 e 30 °C e umidades relativas de 70, 80 e 90. As equações analisadas de Henderson Modificada e Chung foram reformuladas para melhor se ajustarem aos dados experimentais. Verificaram que a modificações realizadas apresentaram resultados relevantes devendo ser incluídas como modelos matemáticos para obtenção da umidade de equilíbrio do arroz em casca. Atualmente, os modelos de Henderson reformulada e Chung modificada sugeridos por Banaszek e Siebenmorgen (1990b) são os modelos de Henderson modificado e Chung-Pfost utilizadas por Goneli et al. (2007), Resende et al. (2006a) e Resende et al. (2006b).

A análise das equações clássicas para secagem de grãos, realizada por Lehn e Pinto (2004), verificaram o modelo que melhor se ajustassem aos dados experimentais, obtidos na secagem de arroz em casca, em silos de armazenagem. A determinação de isotermas de equilíbrio foi indispensável para a avaliação da interação do sólido com o vapor de água presente no ar de secagem, uma vez que sua temperatura e umidade relativa não foram constantes. Os parâmetros das equações de isotermas de Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Oswin e Halsey, para grãos, foram determinados por meio da análise de dados de umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio de arroz em casca, obtidos pelo método estático, empregando soluções ácidas, sendo o tratamento dos dados realizado por meio de análise de regressão não-linear, pelo método dos mínimos quadrados. Concluíram que a equação de Halsey apresentou o melhor ajuste aos dados de umidade de equilíbrio, nas temperaturas de 10, 15 e 20°C.

Para determinar as isotermas de dessecagem dos grãos de arroz em casca da variedade Urucuia, Resende et al. (2006a), utilizaram diversas condições de temperatura e umidade relativa do ar. Os experimentos foram realizados através do método dinâmico em que as condições de temperatura (25, 35, 45 e 55 °C) e umidade relativa do ar (variando entre 0,30 e 0,85) foram respectivamente fornecidas por uma unidade condicionadora de atmosfera, na qual foram colocadas bandejas removíveis com o fundo telado para permitir a passagem do ar através da massa de grãos, contendo inicialmente cada uma, 50 g de produto. Foram ajustados aos dados experimentais os

modelos matemáticos de Sigma-Copace, Sabbah, Oswin-Modificado, Henderson, Henderson-Modificado, Halsey-Modificado, Copace e Chung-Pfost. Com base nos resultados obtidos, concluíram que o teor de água de equilíbrio do arroz em casca decresce com o aumento da temperatura, para uma mesma umidade relativa, seguindo a tendência da maioria dos produtos agrícolas já estudados. Baseando-se em parâmetros estatísticos o coeficiente de terminação (R^2), o erro médio relativo (P), o erro médio estimado (SE) e o comportamento da distribuição de resíduos, o modelo proposto por Chung-Pfost ($R^2=98,12$; $P=3,1710$; $SE=0,4837$) é o que melhor representou a higroscopicidade do arroz em casca, quando comparado aos demais modelos utilizados para descrição do fenômeno.

Goneli et al. (2007) determinaram as isotermas de equilíbrio higroscópico por dessorção dos grãos de arroz branco em casca de modo experimental e modelagem. Utilizaram o método dinâmico e estático para uma faixa de temperatura de 10°C a 50°C e umidade relativa de 10% a 85%. Para determinação do modelo estatístico foram testados os modelos de Sigma-Copace, Sabbah, Oswin Modificado, Henderson, Henderson Modificado, Halsey Modificado, Copace e Chung Pfost Modificado que são os mais comumente utilizados na representação higroscópica de grãos obtidos pelos dois métodos. Concluíram que o modelo de Chung Pfost Modificado pode representar satisfatoriamente a higroscopicidade do arroz pelos dois métodos. Utilizando a técnica de identidade dos modelos, verificaram que não era viável definir uma única equação que representasse os dados experimentais dos dois métodos analisados. Além disso, os valores do teor de água obtidos pelo método dinâmico são próximos ou superiores aos obtidos pelo método estático.

Basunia e Abe (2001) determinaram as isotermas de dessorção do arroz branco em casca de uma variedade japonesa em várias combinações de temperatura (11,8 - 51,1°C) e umidade relativa (37,1 - 89,7%). A umidade inicial do produto era de 24% b.u. O método dinâmico foi utilizado para obter os dados experimentais. As amostras eram depositadas em um recipiente sobre uma balança eletrônica e condicionadas dentro de uma câmara controladora de temperatura e umidade relativa. Um computador conectado a balança realizava uma leitura a cada minuto e o processo era finalizado quando a variação da umidade do produto no período de secagem variasse 0,1% em base seca. Em seguida, determinava-se a umidade das amostras para serem utilizadas nos ajustes dos modelos matemáticos. Chung Pfost foi o modelo mais recomendado considerando os valores do coeficiente de determinação, erro médio estimado e erro médio relativo.

Iguaz e Vírveda (2007) determinaram as isotermas de dessorção do arroz branco em casca da variedade Lido cultivado na Espanha. Utilizou-se o método estático com soluções ácidas para as temperaturas de 40 a 80 °C e umidade relativa de 14 a 90%. Verificaram que dentre os modelos ajustados aos dados experimentais, quase todos os modelos tri-paramétricos apresentaram resultados satisfatórios por P, SE e R^2 . Porém, o modelo de GAB ainda apresentou os melhores resultados, sendo este recomendado para representar a higroscopicidade do arroz Lido.

2.3.6 Pesquisas relacionadas a isotermas de outros produtos agrícolas

A determinação da umidade de equilíbrio e secagem natural do gergelim foi realizada por Almeida et al. (1999). A secagem natural consistiu na exposição das plantas à luz solar. Este processo foi conduzido até que as sementes atingissem teor de umidade de aproximadamente 6% b.u. Os teores de umidade de equilíbrio foram determinados utilizando-se soluções de ácido sulfúrico, com 98% de pureza, para uma faixa de umidade relativa de 17 a 85%. Por meio do método estático, as amostras eram armazenadas em potes herméticos contendo as respectivas soluções e levadas a incubadora com temperatura controlada de 20, 30 e 40° C $\pm$ 1° C. Para o ajuste das isotermas de adsorção foram testados os modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin, com a finalidade de se obter os seus coeficientes por meio de regressão não linear. E para a avaliação dos ajustes dos modelos testados, foi calculado o erro médio relativo (P) como critério de melhor ajuste. Ante os resultados, concluíram a necessidade de 35 dias para as sementes atingirem a umidade de 6,1% b.u. e o modelo GAB foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Para determinação das isotermas de dessorção das sementes de milho doce (*Zea mays* L.), Araújo et al. (2001) utilizaram as cultivares Superdoce e Doce Cristal, e ajustaram diferentes modelos matemáticos aos dados obtidos. As sementes das duas cultivares foram submetidas à dessorção em diversos níveis de temperatura (30, 40, 50 e 60 °C), combinados com diferentes umidades relativas do ar (30, 40, 50 e 60%), até atingirem a umidade de equilíbrio. Os seguintes modelos matemáticos foram ajustados por análise de regressão: Henderson-Thompson, Chung-Pfost, Copace, Sigma-Copace, Sabbah e Smith. As sementes das duas cultivares apresentaram umidades de equilíbrio higroscópico semelhantes. Os valores da variância explicada e do desvio-padrão, bem como a distribuição dos resíduos, das duas cultivares, indicam que as equações de Chung-Pfost, Sabbah e Smith foram as que melhor se ajustaram aos dados experimentais, com pequena superioridade da primeira.

Park et al. (2001a) abordaram o estudo teórico-experimental da atividade de água de pêras (*Pyrus sp.*) in natura e desidratadas osmoticamente a 55 °Brix e 40 °C. Foram construídas as isotermas para três níveis de temperatura (40, 60 e 80 °C) e umidade relativa variando entre 0,11 e 0,79. Ajustaram os seguintes modelos matemáticos: Langmuir, BET, BET linear, GAB, Halsey, Oswin, Peleg, Chung e Henderson. O método estático foi utilizado para determinação da umidade de equilíbrio utilizando soluções de sais saturados. O modelo que melhor se ajustou foi o de Henderson, entre os modelos que englobam a temperatura, com o coeficiente de determinação (R^2) equivalente a 0,97 e erro médio relativo (P) equivalente a 43,28% para pera desidratada e 50,35% para pêra in natura. Em relação aos modelos que tratam as isotermas isoladamente, os modelos de Peleg, GAB e Oswin apresentaram os melhores ajustes para a pêra desidratada e in natura.

As curvas de dessorção das sementes de Jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra* Fr. All.), Angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* Benth.) e Óleo-copaíba (*Copaifera langsdorffii* Benth.) foram determinadas experimentalmente por Mesquita et al. (2001), que ajustaram diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais. O experimento foi realizado pelo método estático onde as

amostras foram colocadas e acondicionadas em dessecadores contendo soluções salinas saturadas forçando a umidade relativa entre 0,32 a 0,98 e submetidas as temperaturas de 5 e 25 °C. As sementes foram pesadas diariamente em balança analítica com precisão de quatro casas decimais e a umidade de equilíbrio foi considerada atingida quando seu peso manteve-se constante. Neste ponto, foi determinada a umidade de equilíbrio para cada repetição pelo método padrão da estufa. Os modelos matemáticos utilizados para ajuste aos dados experimentais foram: Henderson, Henderson modificada, Chung-pfost, Sabbah, Copace, Sigma-copace. Dentre os modelos ajustados, Sigma-Copace, com as constantes determinadas para as espécies de Jacarandá-da-bahia ($R^2=0,9707$, $SE=3,37$) e Angico-vermelho ($R^2=0,9742$, $SE=5,49$), foi o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, já para a Óleo-copaíba, a equação de Henderson-Modificada ($R^2=0,9779$, $SE=1,85$) foi a que melhor representou os dados experimentais.

O conhecimento da umidade de equilíbrio como parâmetro para a redução da atividade de água da framboesa produzida e comercializada na Espanha foi enfatizado por Moraga et al. (2003). Os pesquisadores determinaram as isotermas de adsorção da framboesa sob condições de temperatura (30, 40, 50 e 60 °C) e umidade relativa (variando entre 0,11 e 0,75) para conservação do produto em embalagem plástica. Para obtenção do equilíbrio higroscópico foi utilizado o método estático com soluções saturadas de sais. Foram ajustados os modelos matemáticos de GAB, BET e Gordon-Taylor aos dados experimentais. Dos modelos matemáticos apresentados Gordon-Taylor representou melhor a higroscopicidade da framboesa sobre essas condições de temperatura e umidade relativa com o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,95$).

Ferreira e Pena (2003) avaliaram o comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*) obtida por secagem em estufa a 70 °C. Obtiveram dados de equilíbrio de adsorção nas temperaturas de 15 e 35 °C, por meio do método estático, onde recipientes de 500 mL, contendo soluções saturadas dos sais, foram utilizados como ambientes geradores de umidade relativas constantes, na faixa de 0,11 a 0,97, aos quais foram submetidas duplicatas de amostras do produto em aproximadamente 1 g. A partir dos estados de equilíbrio foram construídas isotermas de adsorção de umidade e a umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura. Verificaram que a aplicabilidade do modelo de GAB na predição de dados de equilíbrio do produto era melhor do que o modelo de BET. Além disso, concluíram que a farinha de pupunha apresentou baixa higroscopicidade, ou seja, baixa afinidade por moléculas de água.

Corrêa et al. (2005) determinaram as isotermas de sorção das espigas de milho. Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico das espigas de milho foi utilizado o método estático, em câmaras com temperatura controlada, contendo no seu interior dessecadores com soluções salinas saturadas. As temperaturas variaram entre 10, 20, 30, 40 e 50°C e a umidade relativa entre 0,11 e 0,84. As amostras foram pesadas periodicamente, sendo o equilíbrio higroscópico alcançado quando a variação da massa das amostras foi igual ou inferior a 0,01 g. Os modelos matemáticos de Henderson modificado, Chung Pfost modificado, Halsey modificado, Oswin modificado foram ajustados aos dados experimentais. Para a avaliação do grau de ajuste de cada modelo, consideraram a magnitude do coeficiente de determinação ajustado (R^2), erros médio relativo (P) e estimado (SE), e a verificação do comportamento da distribuição dos resíduos. Concluíram que

a higroscopicidade da espiga de milho seguem a mesma tendência da maioria dos produtos agrícolas e que os modelos de Chung-Pfost Modificado, Halsey Modificado e Oswin Modificado representam adequadamente o fenômeno.

A umidade de equilíbrio de grãos de milheto (*Piptatherum miliaceum*), alpiste (*Phalaris canariensis* L.) e painço (*Setaria italica*) foram determinadas por Corrêa et al. (2006). As isotermas de sorção foram realizadas para diferentes níveis de temperatura do ar (20 e 60 °C) e de atividade de água do produto (0,20 a 0,80). A temperatura e a umidade relativa do ar foram controladas por meio de uma unidade condicionadora de ar. Os resultados foram avaliados ajustando-se os seguintes modelos matemáticos: Chung-Pfost, Oswin, Smith e Henderson-Modificado. Tomando os critérios estatísticos (R^2 , SE, P e distribuição de resíduos), concluíram que a equação proposta por Oswin foi o que melhor representou os dados experimentais para o milheto, enquanto o modelo de Chung-Pfost para alpiste e painço.

Em outro estudo, Resende et al. (2006b) determinaram o teor de água de equilíbrio dos grãos de feijão por meio do método dinâmico para temperaturas entre 25 e 55 °C e atividades de água, entre 0,20 e 0,75. Observaram que o teor de água decresce com o aumento da temperatura para uma dada atividade de água à semelhança dos produtos higroscópicos. Aos dados experimentais foram ajustados seis modelos matemáticos: BET, Chung Pfost, Copace, GAB, Halsey Modificado, Henderson, Henderson Modificado, Oswin, Sabbah e Sigma Copace. Segundo os parâmetros estatísticos de análise (R^2 , P, SE e Distribuição de resíduos), o modelo de Halsey Modificado foi o que descreveu melhor a higroscopicidade do feijão. A partir dos resultados obtidos calcularam o calor isostérico para cada teor de água de equilíbrio. Observaram que o calor isostérico aumenta com a diminuição do conteúdo de água do produto, indicando que a redução do teor de água aumenta a energia necessária para a remoção de água. Os valores de calor isostérico para os grãos de feijão na faixa de umidade de 10,10 a 21,71 (% b.s.), variam de 3961 a 2718 kJ.kg⁻¹.

As isotermas de equilíbrio higroscópico de milho nas espigas (*Zea mays* L.), estudadas por Palacin et al. (2006), para as variedades AG 1051 e AG112 foram determinadas por meio do método dinâmico utilizando uma unidade condicionadora de ar. As espigas foram acondicionadas em bandejas com o fundo de telas perfuradas com aproximadamente 10 g em três repetições. Os tratamentos de dessorção de umidade foram dispostos em um esquema fatorial 3x4 com três níveis de temperatura (45, 50 e 55 °C), quatro níveis de umidades relativas (0,21; ,28; 0,39; 0,49 em decimal) e três repetições no delineamento inteiramente casualizado. O modelo ajustado aos dados experimentais foi o de Sharaf-Eldeen com significância dos modelos em torno de 5% de probabilidade. Com os resultados observados, concluíram que o modelo de Sharaf Eldeen, ajustado por regressão não linear, pode ser utilizado para prever os valores de umidade de equilíbrio higroscópico de grãos de milho nas espigas. E que a umidade de equilíbrio aumenta com a elevação da umidade relativa e com a diminuição da temperatura.

Cordeiro et al. (2006) determinaram as isotermas de adsorção e dessorção para folhas de *Maytenus ilicifolia* e compararam os resultados experimentais com cinco modelos matemáticos: Chung-Pfost, Halsey Modificada, Oswin Modificada, Henderson-Thompson e Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB). Os experimentos foram realizados na Universidade de Ribeirão Preto

utilizando o método estático com uso de soluções salinas saturadas. Para o experimento de dessorção, foram utilizadas como amostras, as folhas in natura, enquanto, para os experimento de adsorção as folhas foram submetidas à desidratação por meio de uma estufa de circulação de ar a 40 °C durante 48 horas. As amostras foram colocadas em recipientes de pesagem com aproximadamente 3 g e sem seguida foram colocadas em recipientes de vidro com soluções dos sais: LiCl, CH₃COOK, MgCl₂·6H₂O, K₂CO₃, NaNO₂, NaCl e KCl fornecendo umidades relativas entre 11 a 85%. Cada experimento foi submetido às temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. E levaram cerca de 30 dias para que as amostras atingissem o equilíbrio. Para ajuste do melhor modelo matemático aos dados experimentais, além do auxílio do programa STATISTICA foram utilizados o coeficiente de determinação (R²), o erro relativo (P), o resíduo da soma dos quadrados (SE) e a distribuição de resíduos no gráfico. Diante dessas verificações, foi observado que para as curvas de dessorção, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Henderson - Thompson, enquanto o modelo de Chung Pfost se adaptou melhor para representação das curvas de adsorção. Por tanto ambos modelos poderão ser usados para representação da higroscopicidade das folhas de *Maytenus ilicifolia*.

O estudo de Ascheri et al. (2006) sobre o efeito da extrusão na adsorção de água de farinhas mistas pré-gelatinizadas de arroz (FAP) e bagaço de jabuticaba (FBJ), foi realizado em função das características de adsorção de água e da estabilidade dos produtos extrusados. As características de adsorção de água das FAP, FBJ e de suas misturas foram comparadas e estudadas por meio de isothermas de adsorção expressas como atividades de água (Aw), que variaram de 0,113 a 0,973, a temperatura de 25°C. Os dados experimentais das isothermas foram ajustados a modelos matemáticos de GAB, o que originou o coeficiente Ue (umidade de equilíbrio na monocamada) aplicada à metodologia de superfície de resposta (MSR) como variável resposta para avaliar a estabilidade das farinhas extrusadas. Os resultados obtidos permitiram verificar a importância das três variáveis durante o processo de extrusão. As curvas das isothermas apresentaram características de superfícies hidrofílicas de forma sigmoideal do tipo II. A região de umidade intermediária das isothermas revelou que a FAP adsorve maior quantidade de água por unidade de Aw, seguida pelas misturas extrusadas. A FBJ mostrou ser menos higroscópica neste caso. Quanto à estabilidade das misturas extrusadas, as três variáveis de extrusão foram significativas, verificando-se um aumento das variáveis de extrusão com o aumento da FBJ e com o aumento da temperatura, enquanto que houve um decréscimo com a velocidade de rotação, porém, de menor efeito. A combinação de valores elevados de temperatura e porcentagem de FBJ aumentou a estabilidade das farinhas extrusadas.

No estudo das isothermas de sorção para macadâmias, Fadini et al. (2006), utilizaram dois produtos à base de macadâmias, sendo um doce e outro salgado. Observam algumas alterações físicas e sensoriais (crocância, mela e aglomeração), além da ocorrência de crescimento microbiano nos produtos em equilíbrio em sete ambientes com diferentes umidades relativas (de 16,24 a 84,20%), estocados a 25°C. Para o ajuste das isothermas foram testados os modelos de GAB, BET e Oswin. A equação de GAB foi a que melhor se ajustou para as duas isothermas, seguida das equações de BET e Oswin. As umidades relativas de 43,2 e 57,6% foram consideradas como valores

limitantes para a manutenção da qualidade dos produtos salgado e doce, respectivamente. Umidades relativas acima de 75,1% levaram à degradação microbiológica dos produtos estudados.

O estudo das isotermas de sorção para sementes de feijoeiro dos cultivares Tibatã e Una foram realizados por Francisco et al. (2007). Os graus de umidade das sementes de feijoeiro, dos dois cultivares foram ajustados, a partir de seu valor inicial, em diferentes níveis antes do armazenamento, usando-se dessecadores com sílica gel, constantemente regenerada ou por meio de reidratação sobre água (camada de água de 4cm em sua parte inferior), ambos a 25°C. Para o controle da quantidade de água removida ou sorvida durante a secagem ou reidratação das sementes, as subamostras foram pesadas periodicamente. O processo foi encerrado ao ser atingido o peso correspondente ao grau de umidade final desejado para cada tratamento e foi determinado, utilizando-se o método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas (BRASIL, 1992). A determinação da atividade de água (A_w) foi realizada utilizando-se um higrômetro com resolução de 0,01 A_w , empregando a técnica do ponto de orvalho em espelho resfriado. Este equipamento é acoplado a um banho termostatzado, de marca Brookfield, modelo TC 500, com resolução de 0,1°C. As determinações foram feitas a $25 \pm 0,3^\circ\text{C}$, usando-se três subamostras de sementes moídas para cada grau de umidade. As equações empíricas usadas para correlacionar as isotermas de sorção das sementes foram os modelos de Peleg, GAB, Langmuir, Halsey e Oswin. E para a avaliação do ajuste de cada modelo foi realizada através do desvio relativo (P) entre os dados experimentais e os valores estimados pelos diferentes modelos. Concluíram que os modelos de isotermas de sorção que apresentaram melhor ajuste são os de Oswin e Peleg para sementes de feijoeiro, cultivares Tibatã e Una, respectivamente.

Vieira et al. (2007) determinaram as isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. A pitanga em pó foi produzida pelo processo de secagem em camada de espuma, a 70°C, tendo como facilitadores da secagem um emulsificante/estabilizante e um espessante. Os dados experimentais foram obtidos por meio do método gravimétrico estático nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C, com nove tipos de soluções saturadas de sais CH_3COOK , MgCl_2 , K_2CO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaBr , NaCl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KCl , K_2CrO_4 forneceram umidades relativas entre 0,23 e 0,95. Os modelos matemáticos de Peleg, GAB e Oswin foram ajustados aos dados experimentais. A pitanga em pó demonstrou alta higroscopicidade e as amostras atingiram o equilíbrio higroscópico entre 2 e 30 dias. Os modelos de Peleg e GAB produziram ajustes satisfatórios, com o modelo de Peleg resultando nos melhores parâmetros de ajuste ($R^2 > 0,98$ e $P < 4\%$). As isotermas foram classificadas como sendo do Tipo II.

Visando estudar a influência da temperatura nas isotermas de *Calendula officinalis* L. para obter o modelo matemático que melhor satisfaça as condições avaliadas, Silva et al. (2007) determinaram em três temperaturas (30, 45 e 60°C), por meio do método gravimétrico, e verificaram a influência da temperatura na atividade de água. As curvas experimentais foram ajustadas usando os seguintes modelos matemáticos: BET, GAB, Halsey, Oswin, Peleg, Henderson e Chung Pfost. O erro relativo entre os valores experimentais e os valores estimados foi calculado em cada curva, a fim de se avaliar qual equação melhor se ajustaria aos dados experimentais. O modelo que apresentou o menor erro médio relativo foi o de Peleg, com 9,40% na temperatura de 30°C, 5,71% para a temperatura de 45°C e 3,36% para a temperatura de 60°C.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Vegetais do Curso de Engenharia Agrícola da Unidade Universitária de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Goiás (UEG) em Anápolis /GO. Para determinação da umidade de equilíbrio utilizou-se o método estático com o uso de soluções de sais saturados, segundo metodologia descrita por Silva et al. (2000a) e utilizada por Corrêa et al. (2005).

3.1 MATÉRIA - PRIMA

Foi utilizado como matéria-prima o arroz-vermelho em casca, sendo duas variedades utilizadas, conhecidas na região Nordeste, PB 01 e PB05, fornecidos pela Embrapa Arroz e Feijão e cultivadas pela Embrapa Meio Norte, sendo o teor de água inicial do produto de 12,78% b.u e 11,65% b.u. para as variedades PB01 e PB05, respectivamente. Os produtos foram beneficiados, submetidos aos processos de secagem e limpeza e armazenados em sacos plásticos em refrigerador até o seu uso para experimento.

3.2 PREPARO DAS SOLUÇÕES

A atmosfera com umidade relativa constante foi obtida por meio das soluções saturadas com os seguintes sais: Cloreto de Lítio (LiCl), Cloreto de Magnésio (MgCl_2), Nitrato de Magnésio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), Cloreto de Sódio (NaCl), Cloreto de Potássio (KCl) e Sulfato de Potássio (K_2SO_4), Tabela 10. As soluções saturadas foram preparadas à temperatura de 80 °C e constituídas por água destilada e os sais citados nas proporções mostradas na Tabela 6. Cada solução foi depositada em um recipiente de vidro, com tampa hermética. Os sais foram escolhidos de maneira a obter-se a atividade de água na faixa de 0,11 a 0,97 conforme observa-se na Tabela 10 baseados em literatura (ROSSI e ROA, 1980).

TABELA 10 - Atividades de água de vários sais nas temperaturas de 30, 50 e 70 °C estimadas pelas equações de Labuza et al. 1985

Sal	Temperatura (°C)		
	30	50	70
LiCl	0,113	0,112	0,112
MgCl ₂	0,323	0,304	0,287
Mg (NO ₃) ₂	0,525	0,488	0,458
NaCl	0,752	0,749	0,745
KCl	0,844	0,818	0,795
K ₂ SO ₄	0,973	0,962	0,952

3.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para obtenção das amostras a serem submetidas ao processo de adsorção, 150 g do produto foram submetidos a secagem em estufa com temperatura controlada a 60 °C por sete dias até atingir o teor de água próximo de 2% b.s. Já para a obtenção das amostras a serem submetidas ao processo de dessorção, 150 g do produto foi reumidecido até 30% b.s. No processo de reumidecimento, 150 g dos grãos foram colocados em saco plástico com aproximadamente 20 mL de água destilada aspergida sobre o produto, e logo após, armazenado por dois dias em uma B.O.D a 5 °C ou, até ocorrer reumidecimento necessário. Este método também foi utilizado por Vasconcelos (1998) que utilizou um refrigerador para acondicionamento do produto em um período aproximado de 10 dias para que ocorresse a uniformização da umidade da massa de grãos.

3.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA

No final dos processos de reumidecimento, de secagem e de sorção foram determinados os teores de água das amostras utilizando-se uma estufa com ventilação forçada de ar marca, regulada a temperatura de 105 ± 3 °C por 24h em 3 repetições, conforme em BRASIL (1992).

3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE SORÇÃO DE ÁGUA

Na determinação das propriedades de adsorção de água das duas variedades de arroz-vermelho as soluções salinas foram depositadas em recipientes de vidro herméticos de 1500 mL, aproximadamente, contendo no interior dos mesmos, suportes para os recipientes de sorção (28 mL), de material plástico, utilizados para a pesagem das amostras, Figura 4. Em cada recipiente de sorção foi colocada aproximadamente 1 g de amostra. Os recipientes herméticos contendo as amostras, em triplicata, foram acondicionados em uma incubadora B.O.D ajustada para fornecer a temperatura de 30 °C e em uma estufa com circulação de ar forçado, ajustadas para as temperaturas de 50 e 70°C. Os recipientes de sorção foram pesados periodicamente em intervalos de 24 h em uma balança de precisão de 0,001 g, até atingir peso constante como mostra a Figura 1A. Como critério para termino do processo de sorção adotou-se a variação, entre três pesagens sucessivas dos recipientes de sorção, de 0,001g.

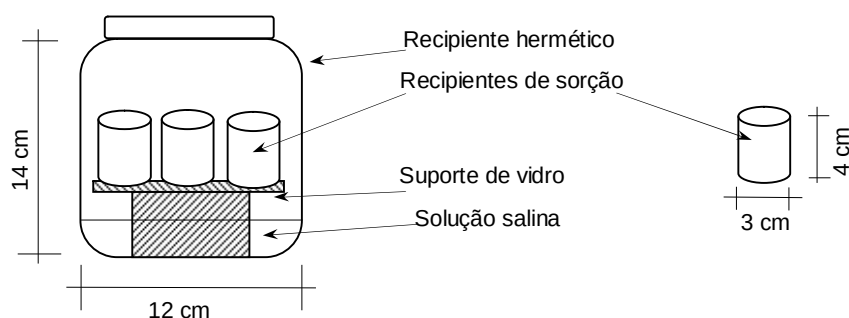


FIGURA 4. Esquema dos recipientes utilizados no experimento.

A temperatura de 30 °C foi utilizada para representar secagem dos grãos em baixas temperaturas. A temperatura de 50 °C simularia a secagem em altas temperaturas (SILVA et al., 2000b; SOARES et al., 2001). Já a temperatura de 70 °C foi considerada como a temperatura máxima utilizada para secagem de grãos de arroz em secadores de fluxos intermitentes. Nesse experimento, será gerado um ambiente com elevada temperatura e umidade relativa para análise experimental sabendo que tal situação difere da realidade (MOTTA et al., 1999).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio com o ambiente do recipiente hermético, foram determinadas os teores de água finais de cada amostra. A umidade de equilíbrio (Ue) do arroz em casca foi estimada como segue:

$$U_e = \frac{m_e - m_i}{m_e} \times 100 \quad (27)$$

em que,

me - é a massa do produto no final do processo de sorção;

mi - é a massa inicial de arroz-vermelho.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram realizados testes preliminares em mais de 20 modelos matemáticos havendo o coeficiente de determinação (R²) como critério de seleção. Os modelos matemáticos de umidade de equilíbrio selecionados são apresentados na Tabela 11, os quais foram ajustados aos dados experimentais, utilizando-se o software Statística 6.0.

TABELA 11 – Modelos matemáticos utilizados para ajuste aos dados experimentais

Nome	Equação	nº
BET	$U_e = \left(\frac{(Xm.c.UR).(1 - (n + 1).UR^n + n.UR^{n+1})}{(1 - UR).(1 + (c - 1).UR - c.UR^{n+1})} \right)$	28
Chen Clayton	$U_e = \frac{-1}{c \cdot T^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-a \cdot T^b} \right]$	29

TABELA 11 - Continuação

Nome	Equação	nº
Chung Pfof	$Ue = -\frac{1}{b} \ln \left[\frac{(T+c) \ln(UR)}{-a} \right]$	30
Chung Pfof Modificado	$Ue = a - b \ln[-(T+c) \cdot \ln(UR)]$	21
Copace	$Ue = \exp^{(a-b.T-c.UR)}$	32
GAB	$Ue = \left(\frac{Xw.c.k.UR}{(1-k.UR).(1-k.UR+c.k.UR)} \right)$	33
Oswin	$Ue = a \cdot \left(\frac{UR}{1-UR} \right)^b$	34
Oswin Modificado	$Ue = (a + b \cdot T) * \left[\frac{UR}{1-UR} \right]^{\frac{1}{c}}$	35
Smith	$Ue = a - (b \cdot T) - c * \ln(1-UR)$	36

em que,

Ue - é a umidade de equilíbrio, decimal, base seca;

UR - é a umidade relativa, decimal;

a, b, c, d, Xm, n e k - são parâmetros das equações em função da temperatura, umidade relativa e produto agrícola.

Na seleção do melhor modelo para prever a umidade de equilíbrio foram considerados: a significância dos coeficientes de regressão, pelo teste t, ao nível de 1% de probabilidade; a magnitude do coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro relativo (P), o erro médio estimado (SE) e a distribuição dos resíduos. Para um bom ajuste matemático P deve ser inferior a 10%, R^2 próximo à unidade, SE o mais próximo de zero e o gráfico dos resíduos na comparação dos valores estimados com os valores residuais apresente distribuição aleatória (BARROS et al. 1995; SOUZA, 1998; GOMES 2000). O erro médio relativo e o erro médio estimado foram estimados para cada modelo matemático pelas expressões 42 e 43, respectivamente, e utilizados por Toleni et al. (2007), Cordeiro et al. (2006), Resende et al. (2006a), Resende et al. (2006b), Palacin et al. (2006) e descrito por Gomes (2000) e Souza (1998).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (37)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (38)$$

em que

P = erro médio relativo, em decimal;

n = número de observações experimentais;

Y = valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$ = valor estimado pelo modelo;

SE = erro médio estimado, em decimal; e

GLR = graus de liberdade do modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROCESSO DE ADSORÇÃO

4.1.1 Determinação da umidade de equilíbrio

Na Tabela 12 são apresentados o tempo decorrido, em dias, para que as amostras de arroz-vermelho atingissem os teores de umidade de equilíbrio, em diferentes temperaturas e umidades relativas. Nota-se que os teores de umidade de equilíbrio foram atingidos entre 7 a 18 dias para a variedade PB01 e 9 a 17 dias para a variedade PB05. Verifica-se, também, que o equilíbrio higroscópico é atingido em menor tempo com o aumento da temperatura do ar. Este fenômeno também foi observado por Iguaz e Vírseda (2007) em seus estudos com arroz.

TABELA 12 - Dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico do Arroz-vermelho em diferentes temperaturas e umidades relativas no processo de adsorção

Variedade PB01					
UR (%)	30 °C	UR (%)	50 °C	UR (%)	70 °C
11,26	16	11,24	15	11,22	7
32,32	15	30,38	15	28,77	10
52,54	17	48,85	15	45,80	10
75,24	17	74,89	15	74,58	14
84,45	18	81,82	17	79,57	14
97,27	18	96,18	17	95,22	15
Variedade PB05					
11,26	15	11,24	15	11,22	9
32,32	15	30,38	15	28,77	10
52,54	17	48,85	15	45,80	10
75,24	15	74,89	15	74,58	14
84,45	17	81,82	17	79,57	14
97,27	17	96,18	17	95,22	15

Os teores de umidades de equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz-vermelho, variedades PB01 e PB05, obtidas por adsorção nas temperaturas e umidades relativas estudadas, são mostrados na Tabela 13. Verifica-se que para uma temperatura constante as umidades de equilíbrio aumentam com o aumento da umidade relativa. Observa-se, também, que para uma atividade de água constante as umidades de equilíbrio diminuem com o aumento da temperatura indicando que as variedades PB01 e PB05 tornam-se menos higroscópicos, o que acontece para a maioria dos produtos agrícolas (CORRÊA et al. 2001; MOURA et al. 2004; VIEIRA et al. 2007).

TABELA 13 – Teores de umidade de equilíbrio higroscópico (decimal, b.s.) do arroz-vermelho, PB01e PB05 obtidos por adsorção para diferentes temperaturas e umidades relativas

Variedade PB01					
UR (%)	30 °C	UR (%)	50 °C	UR (%)	70 °C
11,26	0,0425	11,24	0,0431	11,22	0,0356
32,32	0,0754	30,38	0,0603	28,77	0,0447
52,54	0,1024	48,85	0,0808	45,80	0,0581
75,24	0,1456	74,89	0,1274	74,58	0,0850
84,45	0,1642	81,82	0,1412	79,57	0,1169
97,27	0,2490	96,18	0,2129	95,22	0,1842
Variedade PB05					
11,26	0,0446	11,24	0,0362	11,22	0,0270
32,32	0,0775	30,38	0,0640	28,77	0,0438
52,54	0,1056	48,85	0,0839	45,80	0,0655
75,24	0,1483	74,89	0,1280	74,58	0,1009
84,45	0,1713	81,82	0,1446	79,57	0,1107
97,27	0,2591	96,18	0,2147	95,22	0,1903

4.1.2 Modelagem matemática da umidade de equilíbrio

A Tabela 14 mostra os valores dos coeficientes das equações ajustadas de umidade de equilíbrio, o coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE) e a tendência da distribuição dos resíduos nas diversas temperaturas (Figuras 1B à 4B) para variedade PB01. Os modelos ajustados para descrever a higroscopicidade, de modo geral, apresentaram significância de seus parâmetros de regressão ao nível de 1% de probabilidade pelo teste T.

De acordo com a Tabela 14, para a temperatura de 30 °C, os modelos apresentaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais com R^2 altos, com a exceção apenas do modelo de GAB. As equações de BET, Chen Clayton, Chung Pfof, Chung Pfof Modificado, Copace, apresentaram o SE mais baixos dentre os demais modelos matemáticos e os P inferiores a 10 %. Entretanto, nota-se que apenas os modelos de BET, Chen Clayton, Chung Pfof e Chung Pfof Modificado apresentaram a distribuição de resíduos aleatória (Figura 1B), indicando serem adequados para representação do fenômeno estudado. Os modelos de Chen Clayton, Chung Pfof e Chung Pfof Modificado, por apresentarem resultados estatísticos mais relevantes e semelhantes, são os modelos recomendados para representar a higroscopicidade do arroz-vermelho PB01 na temperatura de 30 °C. Entre estes modelos o mais recomendado é o de Chung Pfof Modificado por ser diferenciado para ajustes higroscópicos do arroz em casca. Banaszek e Siebenmorgen (1990b) também obtiveram resultado satisfatório para o modelo de Chung Pfof nas temperaturas de 12,5; 15; 20 e 30 °C e umidade relativa entre 0.7 a 0.9 para o arroz em casca. E RESENDE et al. (2006a) verificaram que Chung Pfof Modificado representou melhor a higroscopicidade do arroz em casca pelo método dinâmico nas temperaturas entre 25 a 55 °C e umidade relativa entre 30 a 85 %.

Para a temperatura de 50 °C (Tabela 14), todos os modelos ajustados obtiveram o R^2 acima de 98%, com a exceção do modelo de BET. O SE e o erro médio relativo P apresentaram também resultados satisfatórios ($SE \leq 0,084$; $P \leq 7,3088$), exceto o modelo de BET. Considerando a relevância da distribuição de resíduos aleatória (Figura 2B), o modelo de Chung Pfof Modificado

apresentou tendência aleatória, sendo este modelo recomendado para representação higroscópica de PB01. Iguaz e Virseda (2007), por outro lado, verificaram que o modelo de GAB em função da temperatura foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, na faixa entre 40 a 80 °C para a variedade de arroz “Lido”.

O experimento de adsorção a 70 °C, ciente de que o produto sofreu alterações fisiológicas devido a sua exposição a esta temperatura por muitos dias, apresentou resultados estatisticamente satisfatórios. Pela Tabela 14, verifica-se que entre os modelos ajustados, o que apresentou o menor R^2 foi o modelo de Chung Pfost ($R^2 = 90,24$). Nota-se também que os modelos de BET, GAB, Oswin, Oswin Modificado e Smith obtiveram resultados estatisticamente satisfatórios com relação ao SE e o P. Dentre estes modelos, o de Smith é o mais recomendado para representar o fenômeno estudado por apresentar a distribuição de resíduos aleatória (Figura 3B). Araújo et al. (2001) em seus estudos com sementes de milho doce, concluíram que o modelo de Smith ajustou-se melhor aos dados experimentais no processo de dessorção na faixa de 30 a 60 °C e 30 a 60% de umidade relativa.

Analisando-se o intervalo de temperatura (30 a 70 °C) na Tabela 14, apenas o modelo de BET apresentou R^2 mais baixo. Já o modelo de Chen Clayton apresentou o SE mais baixo, o P inferior a 10% e a distribuição de resíduos aleatória (Figura 4B) quando comparado com os demais modelos. Nota-se então que o modelo de Chen Clayton é o mais recomendado para estimar a umidade de equilíbrio para a variedade PB01. Corrêa et al. (2001) verificou que o modelo de Chen Clayton representou o melhor ajuste aos dados experimentais para descrever as curvas de equilíbrio higroscópico da polpa crítica peletizada na faixa de 20 a 35 °C e 50 a 80% de umidade relativa.

TABELA 14 – Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB01 no processo de adsorção

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R^2 (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
BET	30	$X_m = 0,0429$ $c = 680,9506$ $n = 10,6888$	96,91	0,0129	9,7789	Aleatório
	50	$X_m = 505,9165$ $c = 0,0003$ $n = 1,3379$	90,75	0,0190	19,8442	Aleatório
	70	$X_m = 0$ $c = 8207351$ $n = 13$	99,43	0,0045	5,4194	Tendencioso
	30 a 70	$X_m = 0,0$ $c = 468095,2$ $n = 12,1$	89,64	0,0204	16,4263	Aleatório
Chen Clayton	30	$a = 0,517804$ $b = 0,702135$ $c = 0,294547$ $d = 1,256552$	99,74	0,0037	2,7876	Aleatório
	50	$a = 0,222410$ $b = 0,805682$ $c = 0,356716$ $d = 1,065700$	99,45	0,0046	4,9051	Aleatório
	70	$a = 0,530454$ $b = 0,476792$ $c = 0,312659$ $d = 1,026044$	97,84	0,0088	11,7530	Tendencioso

TABELA 14 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Chen Clayton	30 a 70	a = 26,33992 b = -0,43938 c = 11,85779 d = 0,17196	97,04	0,0109	9,6697	Aleatório
Chung Pfost	30	a = -46163,4 b = 21,1 c = -8214,4	99,74	0,0037	2,7877	Aleatório
	50	a = 1085,924 b = 23,063 c = 158,840	99,45	0,0046	4,9051	Aleatório
	70	a = -40138,9 b = 25,1 c = -10332,5	90,24	0,0179	18,9591	Tendencioso
	30 a 70	a = 261,8786 b = 22,7996 c = 6,7268	96,76	0,0114	10,9316	Aleatório
	30	a = 0,249844 b = 0,047290 c = 4,929105	99,74	0,0037	2,7877	Aleatório
Chung Pfost Modificado	50	a = 0,3073 b = 0,0434 c = 179,8882	99,45	0,0046	4,9050	Aleatório
	70	a = 0,2255 b = 0,0409 c = 131,5876	97,84	0,0088	11,7530	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,244209 b = 0,043860 c = 6,726533	96,76	0,0114	10,9316	Aleatório
	30	a = -153,975 b = -5,020 c = 1,985	97,58	0,0011	7,0277	Tendencioso
Copace	50	a = -148,082 b = -2,892 c = 1,986	98,19	0,0084	6,7647	Tendencioso
	70	a = -8,75551 b = -0,06948 c = 2,27405	98,10	0,0083	11,2304	Aleatório
	30 a 70	a = -3,19694 b = 0,00766 c = 2,05412	95,44	0,0135	11,2257	Tendencioso
	30	Xm = -0,0323 c = 0,807062 k = 4,638429	67,40	0,0419	46,5426	Tendencioso
GAB	50	Xm = 0 c = -17413842 k = 1	99,10	0,0059	6,1506	Aleatório
	70	Xm = -0,036 C = 1,000 K = 2408,538	98,79	0,0066	8,1697	Tendencioso
	30 a 70	Xm = -0,013657 C = 0,605645 K = 2,463763	6,44	0,0614	70,2601	Tendencioso

TABELA 14 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Oswin	30	a = 0,099623 b = 0,264537	97,73	0,0110	10,5039	Tendencioso
	50	a = 0,086115 b = 0,288417	98,42	0,0078	7,3088	Tendencioso
	70	a = 0,068253 b = 0,338401	98,00	0,0085	9,3627	Aleatório
	30 a 70	a = 0,082938 b = 0,300924	91,93	0,0180	15,9916	Aleatório
Oswin Modificado	30	a = 1434,139 b = -47,801 c = 4,990	85,04	0,0284	19,7732	Tendencioso
	50	a = 13,51707 b = -0,26862 c = 3,46720	98,42	0,0078	7,3088	Tendencioso
	70	a = 1326,151 b = -18,944 c = 2,955	98,00	0,0085	9,3627	Aleatório
	30 a 70	a = 0,110855 b = -0,000528 c = -0,287574	91,93	0,0128	12,3367	Aleatório
Smith	30	a = 4379,678 b = 145,987 c = 0,057	97,42	0,0117	11,6908	Tendencioso
	50	a = -351,242 b = -7,026 c = 0,054	98,72	0,0070	6,1420	Aleatório
	70	a = 10,00000 b = 0,14245 c = 0,05237	98,99	0,0060	5,9181	Aleatório
	30 a 70	a = 0,082140 b = 0,000825 c = 0,054396	96,68	0,0115	10,7397	Tendencioso

* significativos a 1% de probabilidade pelo teste T

Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros dos modelos de umidade de equilíbrio higroscópicos ajustados para os grãos de arroz da variedade PB05 e também o R², P, SE e a tendência da distribuição dos resíduos (Figuras 5B a 8B) para as temperaturas e umidade relativa estudadas.

Na Tabela 15 verificar-se que os modelos ajustados aos dados experimentais obtiveram R² altos. O menor resultado foi apresentado por BET para a temperatura de 70 °C (R² = 90,83) que também apresentou o SE e o P mais altos que os demais modelos ajustados aos dados experimentais. Nota-se ainda, que dentre todos os modelos analisados distintamente para cada temperatura, a equação de GAB foi o modelo que obteve os melhores resultados estatísticos (R² = 99,64; SE = 0,0045; P = 3,1925 a 30 °C; R² = 99,57; SE = 0,0041; P = 2,7769 a 50 °C e R² = 99,44; SE = 0,0044; P = 4,9444 a 70 °C) e distribuição de resíduos aleatória (Figuras 5B, 6B e 7B). Sendo recomendado por PARK et al. (2001a), em seus estudos com umidade de equilíbrio de pêsca desidratada e *in natura*, verificaram que o modelo de GAB se ajustou melhor aos seus dados experimentais para ambos os tipos de amostras. Almeida et al. (1999) também verificaram que o modelo de GAB representou melhor o fenômeno higroscópico dos grãos de gergelim.

Considerando os ajustes dos modelos para o intervalo de temperatura (30 a 70 °C), da Tabela 15, todas as equações apresentaram R^2 altos, apenas o modelo de BET apresentou o coeficiente de determinação (R^2) mais reduzido. Os modelos de Chen Clayton, Chung Pfof, Copace e Smith apresentaram os erros médios estimados (SE) mais reduzidos, os erros médios relativos inferiores a 10% e a distribuição de resíduos aleatória (Figura 8B) o que indica que todos eles poderiam ser utilizados para representar o fenômeno estudado. Entretanto, o modelo de Chen Clayton é o mais recomendado por apresentar, dentre estes modelos, os melhores resultados estatísticos ($R^2 = 99,41$; $P = 0,0050$; $SE = 4,8625$).

TABELA 15 – Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB05 no processo de adsorção

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R^2 (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
BET	30	$X_m = 0,0436$ $c = -504,4320$ $n = 11,0105$	97,11	0,0130	9,9422	Aleatório
	50	$X_m = 859,9991$ $c = 0,0002$ $n = 1,3109$	92,52	0,0176	18,5278	Aleatório
	70	$X_m = 85,7503$ $c = 0,0002$ $n = 1,8873$	90,83	0,0178	25,5509	Tendencioso
	30 a 70	$X_m = 322,2224$ $c = 0,0003$ $n = 1,5429$	85,19	0,0252	23,4190	Tendencioso
Chen Clayton	30	$a = 0,429079$ $b = 0,752336$ $c = 0,345261$ $d = 1,197905$	99,88	0,0025	1,4282	Tendencioso
	50	$a = 0,148750$ $b = 0,896301$ $c = 0,348605$ $d = 1,064580$	99,62	0,0039	1,8494	Tendencioso
	70	$a = 0,292881$ $b = 0,588959$ $c = 0,333256$ $d = 1,000922$	99,62	0,0063	7,0845	Tendencioso
	30 a 70	$a = 33,34929$ $b = -0,51368$ $c = 11,92145$ $d = 0,15888$	99,41	0,0050	4,8625	Aleatório
Chung Pfof	30	$a = 201,0686$ $b = 20,3048$ $c = 6,2672$	99,88	0,0025	1,428235	Tendencioso
	50	$a = 81,2543$ $b = 22,4400$ $c = -33,6094$	99,62	0,0039	1,8492	Tendencioso
	70	$a = 513,3791$ $b = 23,4195$ $c = 73,5674$	98,82	0,0063	7,0845	Aleatório
	30 a 70	$a = 240,0305$ $b = 21,8209$ $c = 4,7220$	99,15	0,0060	6,6406	Aleatório

TABELA 15 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Chung Pfof Modificado	30	a = 0,31988 b = 0,04925 c = 89,38160	99,88	0,0025	1,4282	Tendencioso
	50	a = 0,245672 b = 0,044563 c = 0,00	99,62	0,0039	1,8494	Tendencioso
	70	a = 8,9946 b = 1,1489 c = 682,7354	98,82	0,0063	7,0845	Aleatório
Chung Pfof Modificado	30 a 70	a = 1 b = 0 c = 1677810	93,94	0,0161	14,2938	Aleatório
Copace	30	a = -154,388 b = -5,034 c = 2,006	97,61	0,0118	7,3454	Tendencioso
	50	a = 0,417116 b = 0,078389 c = 2,000407	98,16	0,0087	6,4750	Aleatório
	70	a = 31,48889 b = 0,50653 c = 2,36594	96,79	0,0105	11,5070	Tendencioso
	30 a 70	a = -3,17585 b = 0,00792 c = 2,07903	97,52	0,0103	8,1670	Aleatório
GAB	30	Xm = 0,0635 c = 21,9641 k = 0,7773	99,64	0,0045	3,1925	Aleatório
	50	Xm = 0,05635 c = 16,94850 k = 0,77118	99,57	0,0041	2,7769	Aleatório
	70	Xm = 0,03975 c = 18,25010 k = 0,83276	99,44	0,0044	4,9444	Aleatório
	30 a 70	Xm = 0,05167 c = 20,53348 k = 0,80155	93,20	0,0171	14,9851	Aleatório
Oswin	30	a = 0,102741 b = 0,266776	98,01	0,0107	9,8223	Tendencioso
	50	a = 0,086908 b = 0,289694	97,86	0,0094	9,7017	Tendencioso
	70	a = 0,066661 b = 0,354425	99,36	0,0047	7,1972	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,084893 b = 0,303310	93,34	0,0169	17,0481	Aleatório
Oswin Modificado	30	a = -502,784 b = 16,763 c = 3,748	98,01	0,0107	9,8222	Tendencioso
	50	a = 13,69058 b = -0,27207 c = 3,45191	97,86	0,0094	9,7015	Tendencioso
	70	a = 51,75176 b = -0,73836 c = 2,82147	99,36	0,0047	7,1972	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,114336 b = -0,000557 c = 3,451919	97,52	0,0103	11,9512	Aleatório

TABELA 15 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Smith	30	a = -6,9053 b = -0,2319 c = 0,0594	97,82	0,0112	10,2123	Aleatório
	50	a = -349,938 b = -7,000 c = 0,055	97,76	0,0096	9,9027	Tendencioso
	70	a = 4986,956 b = 71,242 c = 0,054	99,38	0,0046	6,4135	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,084964 b = 0,000883 c = 0,056635	98,20	0,0088	9,1032	Aleatório

* significativos a 1% de probabilidade pelo teste T

4.2 PROCESSO DE DESSORÇÃO

4.2.1 Determinação da umidade de equilíbrio

O número de dias que as amostras de arroz-vermelho atingiram os teores de umidade de equilíbrio, pelo processo de dessorção, em diferentes temperaturas e umidades relativas pode ser visto na Tabela 16. Observa-se que os teores de umidade de equilíbrio foram atingidos entre 8 a 18 dias para ambas as variedades PB01 e PB05. Assim como foi observado no processo de adsorção (Tabela 9) e por Cavalcanti Mata (1997) com feijão, a umidade de equilíbrio é atingido em menos tempo com o aumento da temperatura do ar.

TABELA 16 – Número de dias decorridos para alcançar o equilíbrio higroscópico de todos do Arroz-vermelho em diferentes temperaturas e umidades relativas no processo de dessorção

Variedade PB01					
UR (%)	30 °C	UR (%)	50 °C	UR (%)	70 °C
11,26	18	11,24	17	11,22	15
32,32	18	30,38	16	28,77	15
52,54	18	48,85	17	45,80	15
75,24	13	74,89	15	74,58	14
84,45	10	81,82	9	79,57	8
97,27	10	96,18	9	95,22	8
Variedade PB05					
11,26	17	11,24	16	11,22	15
32,32	18	30,38	17	28,77	14
52,54	17	48,85	15	45,80	14
75,24	15	74,89	15	74,58	13
84,45	12	81,82	11	79,57	10
97,27	12	96,18	10	95,22	8

As umidades de equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz-vermelho PB01 e PB05 adquiridas por dessorção nas temperaturas e umidades relativas estão na Tabela 17. Nota-se que para o

processo de dessorção a o teor de umidade de equilíbrio aumenta com a redução da temperatura e com o aumento da atividade de água, do mesmo modo como foi observado no processo de adsorção (Tabela 10) e por Araujo et al. (2001) (feijão); Park et al. (2001b) (*Melissa officinallis*) e Ascheri et al. (2005) (arroz).

TABELA 17 – Teores de umidade de equilíbrio higroscópico do arroz-vermelho obtidos por dessorção

Variedade PB01					
UR (%)	30 °C	UR (%)	50 °C	UR (%)	70 °C
11,26	0,0512	11,24	0,0432	11,22	0,0355
32,32	0,0763	30,38	0,0669	28,77	0,0611
52,54	0,1030	48,85	0,0878	45,80	0,0787
75,24	0,1620	74,89	0,1266	74,58	0,1081
84,45	0,1883	81,82	0,1574	79,57	0,1218
97,27	0,2720	96,18	0,2272	95,22	0,2038
Variedade PB05					
11,26	0,0414	11,24	0,0373	11,22	0,0326
32,32	0,0982	30,38	0,0650	28,77	0,0510
52,54	0,1187	48,85	0,1040	45,80	0,0671
75,24	0,1466	74,89	0,1372	74,58	0,1092
84,45	0,1704	81,82	0,1259	79,57	0,1084
97,27	0,2695	96,18	0,1779	95,22	0,1699

4.2.2 Modelagem matemática da umidade de equilíbrio higroscópico

Na Tabela 18 são apresentados os parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico para o arroz-vermelho em casca da variedade PB01, obtidos para o processo de dessorção, em diferentes temperaturas e umidades relativas do ar.

Verifica-se, na Tabela 18, que para a temperatura de 30 °C os modelos de BET, Chung Pfost, Chung Pfost Modificado, Copace e Smith apresentaram o melhores resultados estatísticos com $R^2 \geq 97,18$, $SE \leq 0,0137$ e $P \leq 9,7377$ abaixo de 10% e a distribuição de resíduos aleatórios (Figura 9A), indicando estes modelos para representar o fenômeno de higroscopicidade do arroz-vermelho da variedade PB01 durante o processo de dessorção. Dentre estes modelos, Chen Clayton apresentou os melhores resultados estatísticos ($R^2 = 99,06$; $SE = 0,0058$; $P = 4,5531$) e distribuição de resíduos aleatória conforme a Figura 9B.

Considerando a temperatura de 50 °C, na Tabela 18, nota-se que todos os modelos matemáticos apresentaram os R^2 , SE e os P estatisticamente aceitáveis com exceção do modelo de BET que apresentou o P acima de 10%. Verifica-se, também, que dentre os modelos relevantes estatisticamente apenas o modelo de Smith apresentou a distribuição de resíduos aleatória (Figura 10B), sendo o mesmo mais recomendado para representar o equilíbrio higroscópico da variedade PB01 do arroz-vermelho durante a dessorção. Assim como Araújo et al. (2001) também, recomendou o modelo de Smith para representar as isotermas de milho doce.

Na Tabela 18, para a temperatura de 70 °C nota-se que o modelo de Chung Pfost Modificado ajustou-se melhor aos dados experimentais para a variedade PB01. Vários pesquisadores, Goneli et

al. (2007) (arroz); Toneli et al. (2007) (inulina em pó); Resende et al. (2006a) (arroz); Banaszek e Siebenmorgen (1990b) (arroz) verificaram que este modelo foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais de higroscópio do arroz.

Considerando o intervalo de temperatura (30 a 70 °C) na Tabela 18, os modelos de Chen Clayton, Chung Pfost, Chung Pfost Modificado, Copace, GAB e Smith apresentaram bons resultados. Dentre estes, o modelo de Chen Clayton apresentou os melhores resultados com coeficiente de determinação (R^2) equivalente a 99,11%, o erro médio estimado (SE) em aproximadamente 0,006, o erro médio relativo (P) no valor de 4,9884 e a distribuição de resíduos aleatória (Figura 12B) sendo o mais recomendado para representar o fenômeno de umidade de equilíbrio na faixa de temperatura estudada; assim como foi verificado para o processo de adsorção para as variedades PB01 e PB05 de arroz-vermelho.

TABELA 18 – Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB01 para o processo de dessorção

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R^2 (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
BET	30	Xm = 0 c = 1860563 n = 11	99,02	0,0081	4,7649	Aleatório
	50	Xm = 592,71 c = 0,0002 n = 1,3841	92,45	0,0184	19,6158	Aleatório
	70	Xm = 0,0386 c = 110,2227 n = 10,3377	98,71	0,0067	7,37001	Aleatório
	30 a 70	Xm = 0,0420 c = 382,9433 n = 10,9618	95,39	0,0144	10,0110	Tendencioso
Chen Clayton	30	a = 0,210372 b = 0,954828 c = 0,268757 d = 1,252609	99,06	0,0058	4,5531	Aleatório
	50	a = 0,478840 b = 0,619066 c = 0,497351 d = 0,961391	98,64	0,0078	5,7396	Tendencioso
	70	a = 0,487021 b = 0,549225 c = 0,382689 d = 0,963745	99,65	0,0035	3,6640	Aleatório
	30 a 70	a = 7,228402 b = -0,081911 c = 9,020898 d = 0,220001	99,11	0,0063	4,9884	Aleatório
Chung Pfost	30	a = 83,4038 b = 19,0378 c = -14,5900	99,06	0,0079	5,8432	Aleatório
	50	a = 309,8597 b = 21,3815 c = 7,4303	98,64	0,0078	5,7404	Tendencioso
	70	a = 766,3718 b = 22,9641 c = 82,5863	99,65	0,0035	3,6640	Aleatório

TABELA 18 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Chung Pfast	30 a 70	a = 380,9733 b = 20,8193 c = 24,8173	98,56	0,0081	7,4588	Aleatório
Chung Pfast Modificado	30	a = 0,4455 b = 0,0525 c = 921,9398	99,06	0,0079	5,8432	Aleatório
Chung Pfast Modificado	50	a = 0,3700 b = 0,0468 c = 555,759	98,64	0,0078	5,7404	Tendencioso
	70	a = 0,3358 b = 0,0435 c = 514,3876	99,65	0,0035	3,6640	Aleatório
	30 a 70	a = 1 b = 0 c = 1587850	95,93	0,0137	9,6400	Aleatório
Copace	30	a = 14516,04 b = 483,98 c = 2,05	98,94	0,0083	6,0125	Aleatório
	50	a = -1,20348 b = 0,04388 c = 1,97556	99,11	0,0063	4,6428	Tendencioso
	70	a = -57,5664 b = -0,7722 c = 1,9905	98,61	0,0069	6,4193	Aleatório
	30 a 70	a = -3,12797 b = 0,00580 c = 2,01173	98,95	0,0069	5,6533	Aleatório
Oswin	30	a = 0,108622 b = 0,267270	96,58	0,0151	11,8977	Tendencioso
	50	a = 0,095207 b = 0,279688	96,64	0,0123	9,8641	Tendencioso
	70	a = 0,083926 b = 0,301567	99,10	0,0055	5,899409	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,095380 b = 0,287335	94,62	0,0157	11,6409	Tendencioso
Oswin Modificado	30	a = -123678 b = 4123 c = 4	96,58	0,0151	11,8978	Tendencioso
	50	a = -1162,24 b = 23,25 c = 3,58	96,64	0,0123	9,8638	Tendencioso
	70	a = 129289,9 b = -1847,0 c = 3,3	91,10	0,0055	5,8994	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,119586 b = -0,000468 c = 3,590609	97,18	0,0114	9,9035	Tendencioso
GAB	30	Xm = -0,03502 c = 0,808103 k = 4,675271	63,61	0,0494	46,9677	Tendencioso
	50	Xm = -0,054 c = 1,000 k = 7307,065	97,65	0,0103	9,3169	Tendencioso

TABELA 18 – Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
GAB	70	Xm = 0,05419 c = 0,77526 K = 2408,538	99,81	0,0025	2,5004	Tendencioso
	30 a 70	Xm = 0,06028 c = 21,05480 K = 0,78061	95,99	0,0136	8,6781	Aleatório
Smith	30	a = 6737,414 b = 224,579 c = 0,064	97,18	0,0137	9,7377	Tendencioso
	50	a = 1462,774 b = 29,254 c = 0,058	96,63	0,0123	9,2710	Aleatório
	70	a = 50913,70 b = 727,34 c = 0,06	98,49	0,0072	8,5784	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,080799 b = 0,000642 c = 0,059402	97,15	0,0114	9,7339	Aleatório

* significativo a 1% de probabilidade pelo teste T

A Tabela 19 apresenta os valores dos coeficientes das equações de umidade de equilíbrio, o R², o P, o SE e a tendência da distribuição dos resíduos nas temperaturas de 30 a 70 °C para o processo de dessecção da variedade PB05 do arroz-vermelho.

Conforme a Tabela 19 para 30 °C, os modelos apresentaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais com elevados coeficientes de determinação (R²), sendo que o modelo de BET apresentou o menor valor (R² = 91,45). Apenas as equações de Chung Pfost e Chung Pfost Modificado, apresentaram os SE mais reduzido dentre os outros modelos matemáticos, os P inferiores a 10 % e a distribuição de resíduos aleatória (Figura 13B). E entre os modelos de Chung Pfost e Chung Pfost Modificado, o primeiro é o mais recomendado por haver apresentado o menor erro relativo (P). Iguaz e Vírseda (2007) e Basunia e Abe (2001) verificaram que Chung Pfost representou melhor a higroscopicidade do arroz em casca pelo método dinâmico e pelo método estático em diversas temperaturas e umidades relativas.

Na temperatura de 50 °C da Tabela 19, todos os modelos ajustados obtiveram os R² altos com exceção de Oswin, Oswin Modificado e Smith que obtiveram resultados abaixo de 90%. Dentre os modelos, somente BET e GAB apresentaram resultados satisfatórios para o erro SE e o P. Entretanto, apenas o modelo de BET apresentou a distribuição de resíduos aleatória (Figura 14B), o que indica este modelo ser o mais recomendado para o fenômeno estudado. Silva et al. (2002) em seus estudos de dessecção, notaram que o modelo de BET apresentou resultados estatísticos que recomendam esta equação para representação higroscópica da polpa de manga em diferentes temperaturas e umidades relativas. E Falade et al. (2004) também utilizou o modelo de BET para expressar o fenômeno higroscópico de nozes em seu experimento de adsorção.

Pela Tabela 19 verifica-se, para a temperatura a 70 °C, que entre os modelos ajustados, o que apresentou o menor R² foi o modelo de BET (R² = 94,04). Nota-se que os modelos de Chung Pfost, Chung Pfost Modificado, Copace e GAB obtiveram resultados estatisticamente satisfatórios

com relação ao SE e o P. Dentre estes modelos, a equação de Chung Pfast Modificado é o mais recomendado para representar o fenômeno estudado por apresentar a distribuição de resíduos aleatória (Figura 15B). Corrêa et al (2006) em seus estudos com alpiste e paníço, concluíram que o modelo de Chung Pfast Modificado ajustou-se melhor aos dados experimentais no processo de dessecção em diferentes níveis de temperatura e umidade relativa.

Para o intervalo de temperatura (30 a 70 °C), na Tabela 19, os modelos de BET, GAB e Oswin apresentaram os piores coeficientes de determinação abaixo de 90%. E dentre os demais modelos somente Chen Clayton apresentou o SE mais baixo, o P inferior a 10% e a distribuição de resíduos aleatória (Figura 16B) sendo o modelo recomendado para representação higroscópica da condição analisada, assim como, Corrêa et al. (2001) verificou a relevância do modelo de Chen Clayton para representar as curvas de equilíbrio higroscópico da polpa crítica peletizada.

TABELA 19 – Parâmetros ajustados dos modelos de equilíbrio higroscópico, para os grãos de arroz-vermelho em casca da variedade PB05 para o processo de dessecção.

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
BET	30	Xm = 0,0475 c = 273,8688 n = 10,0873	91,45	0,0225	17,2607	Aleatório
	50	Xm = 0,05594 c = 13,48042 n = 5,38798	96,41	0,0096	5,9196	Aleatório
	70	Xm = 504,097 c = 0,0003 n = 1,1544	94,04	0,0122	17,1950	Aleatório
	30 a 70	Xm = 761,947 c = 0,0003 n = 1,0115	80,53	0,0268	21,1761	Aleatório
Chen Clayton	30	a = 1,403553 b = 0,441415 c = 0,256776 d = 1,284806	98,60	0,0091	8,8083	Aleatório
	50	a = 5,857562 b = 0,140166 c = 0,074142 d = 1,528144	92,12	0,0143	14,1065	Aleatório
	70	a = 0,202102 b = 0,784924 c = 0,497834 d = 0,942909	98,11	0,0069	5,8199	Aleatório
	30 a 70	a = 4,973498 b = 0,090212 c = 4,701756 d = 0,437008	99,11	0,0107	9,8234	Aleatório
Chung Pfast	30	a = -57632,2 b = 20,3 c = -9179,9	98,60	0,0091	8,8082	Aleatório
	50	a = 324,7475 b = 29,2645 c = -17,9601	92,11	0,0142	14,10631	Aleatório

TABELA 19 - Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
Chung Ppost	70	a = 522,3896 b = 27,3429 c = 22,0792	98,11	0,0069	5,8199	Aleatório
	30 a 70	a = 280,2878 b = 24,6137 c = -5,5898	94,99	0,0136	10,5109	Aleatório
Chung Ppost Modificado	30	a = 0,3430 b = 0,0493 c = 197,3017	98,60	0,0091	8,8084	Aleatório
	50	a = 0,2729 b = 0,0342 c = 340,1920	92,11	0,0142	14,1063	Aleatório
	70	a = 0,2428 b = 0,0366 c = 204,7480	98,11	0,0069	5,8196	Aleatório
	30 a 70	a = 1 b = 0 c = 1165499	87,63	0,0214	16,23632	Tendencioso
Copace	30	a = -281,579 b = -9,279 c = 1,862	93,03	0,0203	14,6491	Aleatório
	50	a = -304,429 b = -6,026 c = 1,481	94,68	0,0117	11,9976	Tendencioso
	70	a = -360,710 b = -5,102 c = 1,854	99,10	0,0047	3,6347	Tendencioso
	30 a 70	a = -2,83276 b = 0,00917 c = 1,73175	94,48	0,0143	10,3681	Aleatório
Oswin	30	a = 0,1087 b = 0,2581	97,76	0,0115	12,2116	Tendencioso
	50	a = 0,093209 b = 0,218190	89,18	0,0167	18,5041	Aleatório
	70	a = 0,076051 b = 0,279903	95,82	0,0102	11,8322	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,091823 b = 0,263557	86,58	0,0223	21,11835	Aleatório
Oswin Modificado	30	a = -311,778 b = 10,396 c = 3,874	97,76	0,0115	12,2116	Tendencioso
	50	a = 150441,5 b = -3008,8 c = 4,6	89,18	0,0167	18,5038	Aleatório
	70	a = 59974,14 b = -856,77 c = 3,57	95,82	0,0102	11,8312	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,132071 b = -0,000786 c = 3,989445	94,74	0,0139	15,11246	Aleatório

Tabela 19 - Continuação

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros*	R ² (%)	SE	P (%)	Distribuição dos resíduos
GAB	30	Xm = 0,060 c = 5750,729 k = 0,797	95,74	0,0158	16,4383	Aleatório
	50	Xm = 0,08948 c = 10,05619 k = 0,55287	97,10	0,0086	6,7843	Tendencioso
	70	Xm = 0,05524 c = 13,83087 K = 0,72167	98,68	0,0057	5,7114	Tendencioso
	30 a 70	Xm = 0,06434 c = 16,54130 K = 0,72596	86,38	0,0224	14,83824	Aleatório
Smith	30	a = 24802 b = 826,74 c = 0,06	96,17	0,0150	15,7711	Tendencioso
	50	a = 5,527585 b = 0,109370 c = 0,040876	84,23	0,0202	22,0293	Aleatório
	70	a = 635,7539 b = 9,0816 c = 0,0459	94,85	0,0113	12,2647	Tendencioso
	30 a 70	a = 0,100903 b = 0,000965 c = 0,049686	91,56	0,0177	16,42375	Tendencioso

* significativo a 1% de probabilidade pelo teste T

4.3 ISOTERMAS DE SORÇÃO E HISTERESE DO ARROZ-VERMELHO

As isotermas podem ser observadas nas Figuras 5, 6, 7 e 8. Nota-se que as isotermas possuem uma forma sigmoidal, características de curvas do tipo II, de acordo com a classificação de BET em 1938, considerada padrão para produtos agrícolas. Nota-se, também, para uma umidade relativa constante, o aumento da temperatura promove a redução do teor de umidade de equilíbrio seguindo a tendência da maioria dos produtos agrícolas (ALMEIDA et al., 1999; ASCHERI et al., 2005; CORRÊA et al., 2002; CORDEIRO et al., 2006; FRANCISCO et al., 2007).

$$U_e = (-1 / ((11,8574) * T^{(0,171968)})) * \ln(\ln(UR) / (- (26,3372) * T^{(-0,43935)}))$$

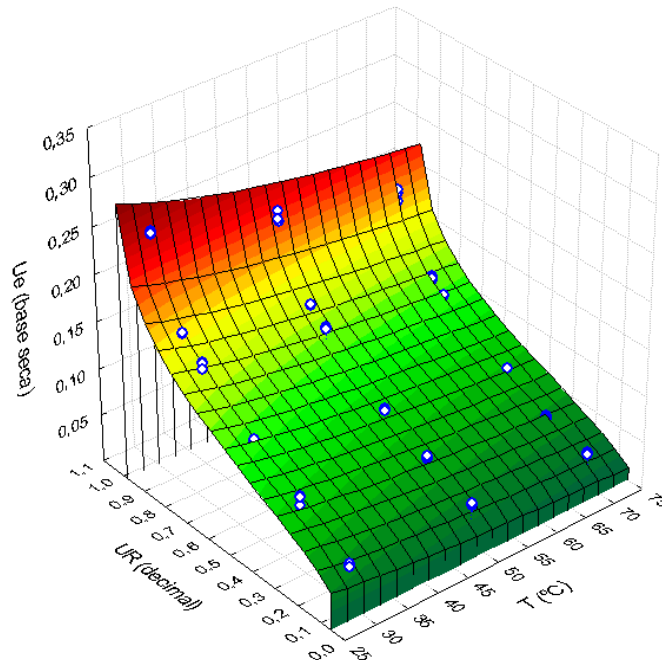


FIGURA 5. Isotermas de adsorção do arroz-vermelho variedade PB01, estimado pelo modelo de Chen Clayton

$$U_e = (-1 / ((11,9215) * T^{(0,158877)})) * \ln(\ln(UR) / (- (33,3493) * T^{(-0,51368)}))$$

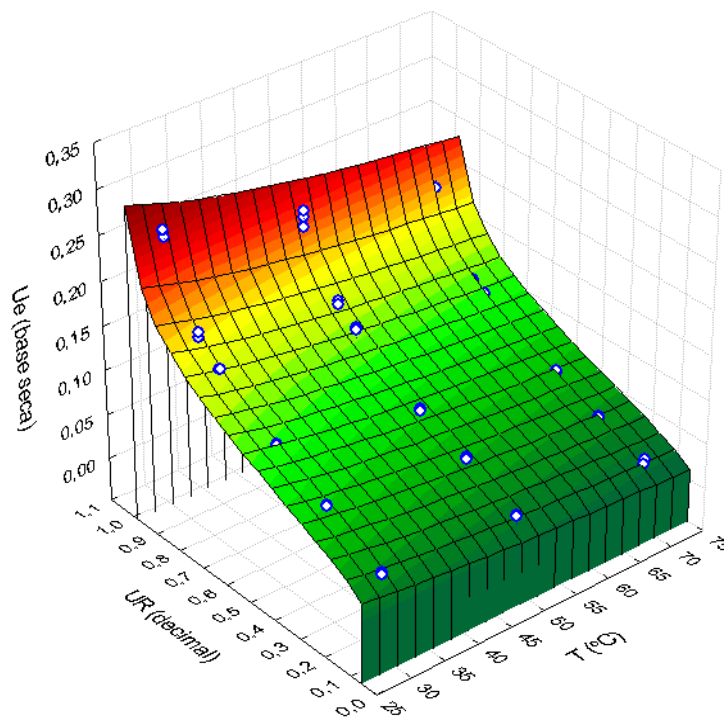


FIGURA 6. Isotermas de adsorção do arroz-vermelho variedade PB05, estimado pelo modelo de Chen Clayton

$$U_e = -1 / ((9,02089) * T^{(0,220001)}) * \ln(\ln(UR)) / (-7,22839) * T^{(-0,08191)})$$

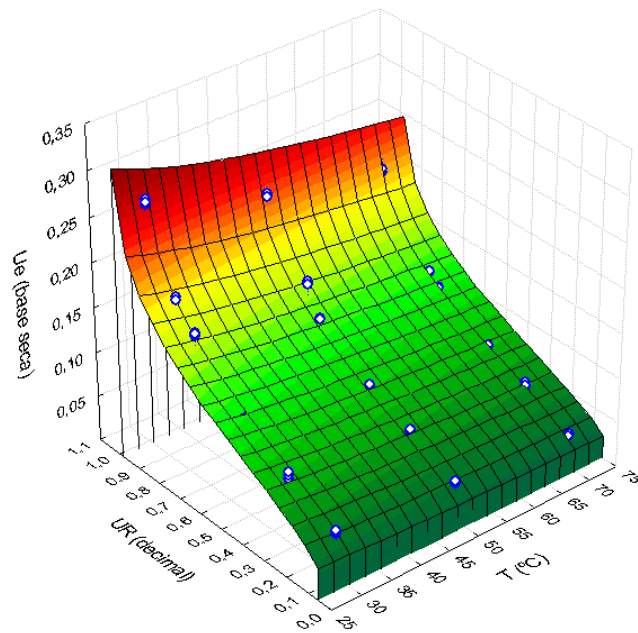


FIGURA 7. Isotermas de dessorção do arroz-vermelho variedade PB01, estimado pelo modelo de Chen Clayton

$$U_e = -1 / ((4,70176) * T^{(0,437008)}) * \ln(\ln(UR)) / (-4,9735) * T^{(0,090212)})$$

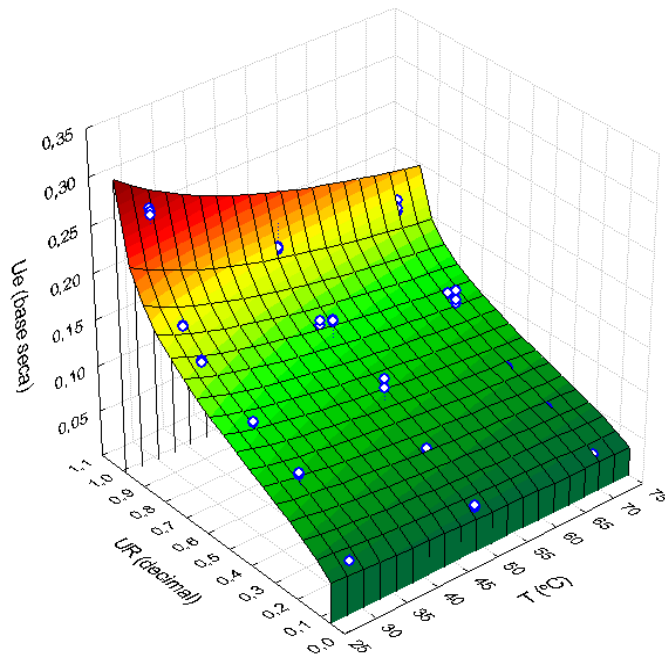


FIGURA 8. Isotermas de dessorção do arroz-vermelho variedade PB05, estimado pelo modelo de Chen Clayton

A histerese do arroz-vermelho, ocorreu pela diferença entre os teores de água obtidos pelos fenômenos de adsorção e dessorção, são mostradas nas Figuras 9 e 10 para as variedades PB01 e PB05 nas temperaturas de 30, 50 e 70 °C, respectivamente. O fenômeno de histerese é comum para produtos agrícolas (isotermas do tipo sigmoidal) pois as isotermas de adsorção e dessorção raramente percorrem o mesmo caminho (DICTFIELD, 2000; ALONSO, 2001; ITO, 2003). Verifica-se nas Figuras 9 e 10, que a histerese do arroz-vermelho, variedades PB01 e PB05, é diretamente proporcional ao aumento da temperatura.

As variedade PB01 e PB05 apresentaram comportamentos diferentes para a histerese. Para a variedade PB01, a histerese aumenta até a umidade relativa 0,92 e logo após tende a diminuir para todas as temperaturas. Entretanto, para a isoterma do arroz-vermelho variedade PB05 a histerese diminui até chegar a um ponto de intersecção em umidades relativas diferentes para cada temperatura ($U_e = 0,114$ e $U_R = 0,70$ à 50 °C; $U_e = 0,097$ e $U_R = 0,68$ à 70 °C) e logo após aumenta com a curva de adsorção superior a de dessorção. Na isoterma a 30 °C, nota-se que a histerese reduz com o aumento da umidade de equilíbrio e umidade relativa.

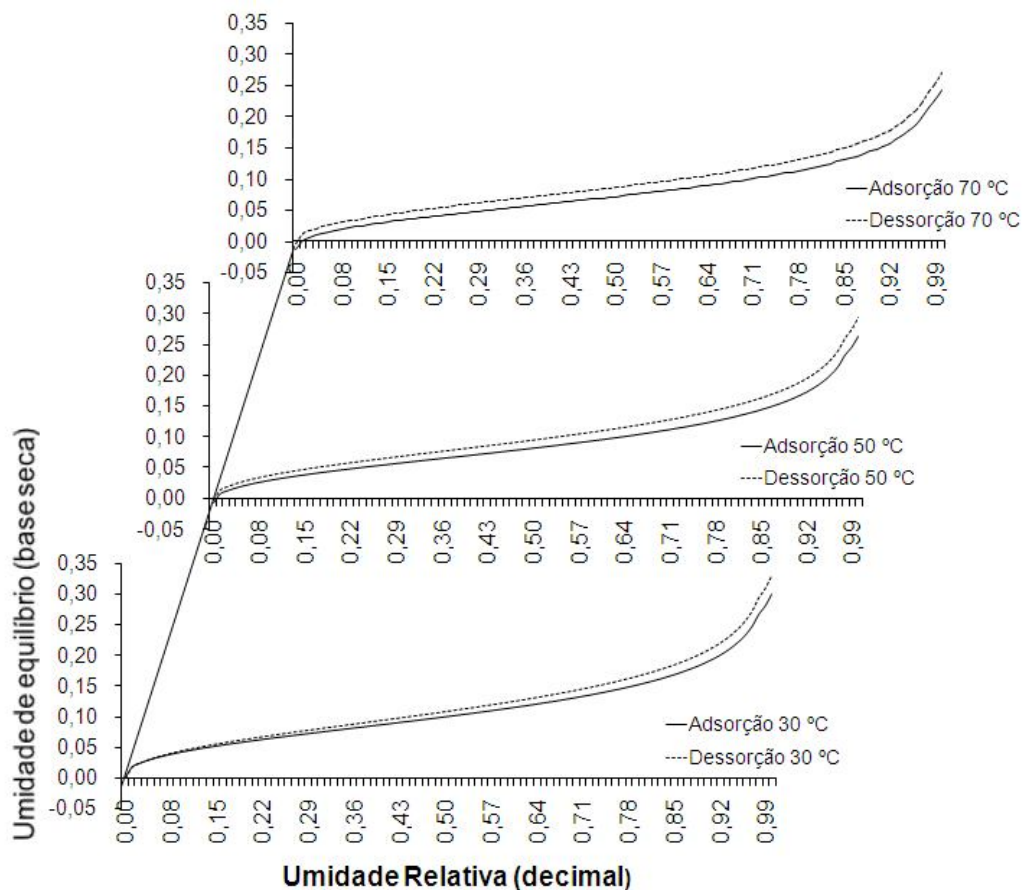


FIGURA 9. Histerese do arroz-vermelho PB01

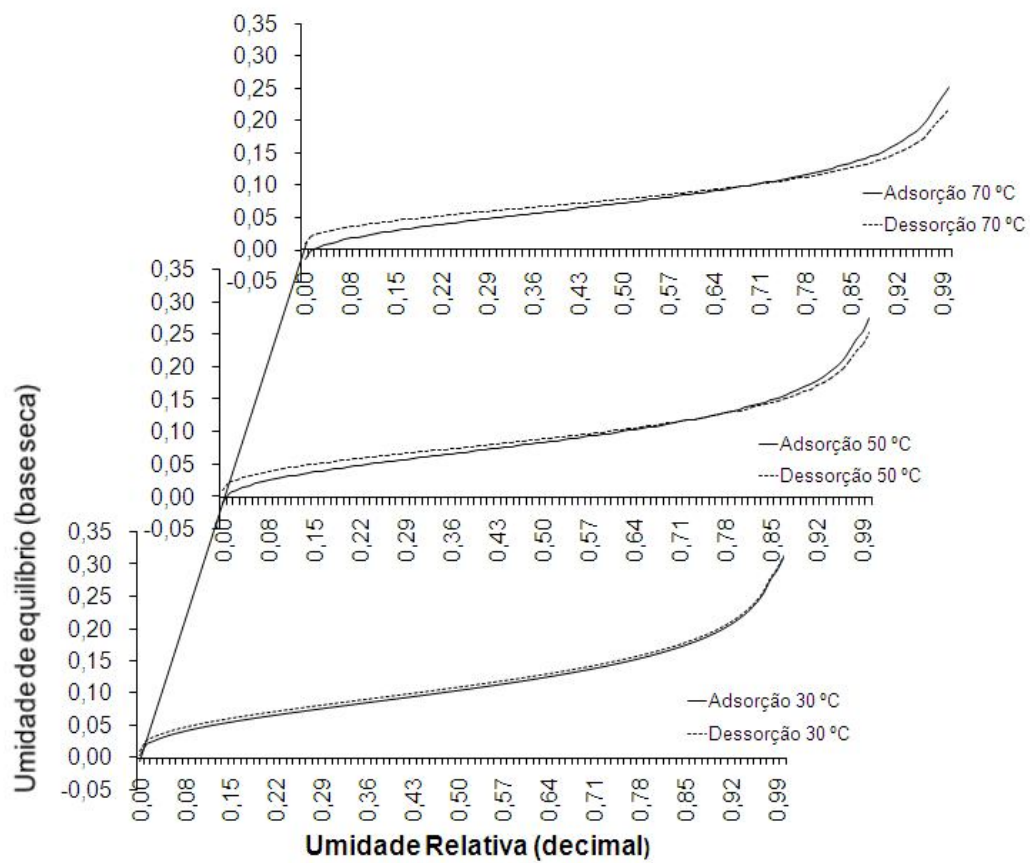


FIGURA 10. Histerese do arroz-vermelho PB05

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho pode-se concluir que:

- As isothermas do arroz-vermelho, variedades PB01 e PB05, possuem formato sigmoidal, característico de curvas do tipo II;
- Para representação das curvas de equilíbrio da adsorção da variedade PB01, os modelos de Chung Pfast Modificado é recomendado para as temperaturas de 30 e 50 °C e o modelo de Smith é recomendado para a temperatura de 70 °C;
- O modelo de GAB é o recomendado para PB05 no processo de adsorção e em todas as temperaturas estudadas;
- No processo de dessorção, os modelos recomendados para PB01 são: Chen Clayton à 30°C, Smith a 50 °C e Chung Pfast Modificado a 70 °C;
- Os modelos matemáticos recomendados para a variedade PB05 são Chung Pfast a 30 °C, BET a 50 °C e Chung Pfast Modificado a 70 °C nos experimentos de dessorção;
- Considerando o intervalo de temperatura entre 30 a 70 °C, o modelo de Chen Clayton é o recomendado para representar a higroscopicidade do arroz-vermelho das variedades PB01 e PB05, nos processos de adsorção e dessorção.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINETO, D.; FLECK, N. G.; MENEZES, V. G.; COSTA, E. L. N. Supressão da produção de sementes de arroz-vermelho pela aplicação de herbicidas em arroz irrigado. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília DF, v. 37, n. 1, p. 57-65, 2002.
- ALMEIDA, O.; CALÇADA, L. A.; MASSARANI, G. Análise de um sistema para levantamento de Isotermas de secagem. **Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas da Terra**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 49-53, 2002.
- ALMEIDA, F. A. C.; FONSECA, K. S.; GOUVEIA, J. P. G. Secagem natural de gergelim e determinação da umidade de equilíbrio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v. 3, n. 3, p. 343-348, 1999.
- ALONSO, S. A.; SANTOS, A. B.; GOMES, A. S. **Cultivo do arroz irrigado no Brasil**. Pelotas RS: Embrapa Clima Temperado, 2005. Versão Eletrônica disponível em: <<http://www.embrapa.cnfap.br>>. Acesso em: 7 Jul. 2007.
- ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de Seleção e Dimensionamento de Secadores**. 2001. 256. Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas SP.
- ARAUJO, E. F.; CORRÊA, P. C.; SILVA, R. F. Comparação de modelos matemáticos para descrição das curvas de dessecamento de sementes de milho-doce. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília DF, v. 36, n. 7, p. 991-995, 2001.
- ASCHERI, D. P. R.; RIBEIRO, M. M.; ASCHERI, J. L. R.; CARVALHO, C. W. P. Isotermas de adsorción de Agua y estabilidad de Harinas extruídas de Amaranto, arroz y maíz: Estudio comparativo. **Alimentaria Artículos Originales Harinas**. v. 363, n. 5, p. 100-107. 2005.
- ASCHERI, D. P. R.; ANDRADE, C. T.; CARVALHO, C. W. P.; ASCHERI, J. L. R. Isotermas de adsorción de Agua y estabilidad de Harinas extruídas de Amaranto, arroz y maíz: Estudio comparativo. **Revista Ciência dos Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 325-335. 2006.
- BANASZEK, M. M.; SIEBENMORGEM, T. J. Moisture adsorption rates of rough rice. **American Society of Agricultural Engineers, Transactions in Agriculture of ASAE**, Fayetteville, v. 33, n. 4, p. 1257-1262, 1990a.
- BANASZEK, M. M.; SIEBENMORGEM, T. J. Adsorption equilibrium moisture contents of long-grain rough rice. **American Society of Agricultural Engineers, Transactions in Agriculture of ASAE**, Fayetteville, v. 33, n. 1, p. 247-252, 1990b.
- BARROS, B. N.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: UNICAMP, 1995. 229p.
- BARROZO, M. A. S. **Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados**. 1998. p.163. Dissertação de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP.
- BASUNIA, M. A.; ABE, T. Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice. **Journal of Stored Products Research**, Matsuyama Japan, v. 37, p. 205-219, 2001.
- BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. 3ed. São Paulo: Livraria Varela, 2001, 252p.
- BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura. Normas de identidade, qualidade, embalagem e apresentação do arroz. Portaria nº 269, de 17 de Novembro de 1988. **Lex: Diário Oficial da União**, Brasília DF. 1988.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília DF: 1992. 365 p.

BRASIL. Portaria Nº 269, de 17 de novembro de 1988. Aprova a norma anexa, assinada pelo Secretário de Serviços Auxiliares de Comercialização e pelo Secretário Nacional de Abastecimento, a ser observada na classificação, embalagem e marcação do arroz. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 de Novembro de 1988.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layer. **Journal of American Chemistry Society**, v. 60, n. 1, p. 309-312, 1938.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) variedade "Carioca" avaliação experimental, modelagem e simulação**. 1997. p.229. Doutorado em Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas SP.

CHEN, C.; MOREY, R. V. Comparison of for EMC/ERH equations. **American Society of Agricultural Engineers, Transactions in Agriculture of ASAE**, Fayetteville, v. 32, n. 3, p.119-125, 1989.

CHETANA, R.; SRINIVASA, P. C.; REDDY, S. R. Y. Moisture sorption characteristics of milk burfi, an traditional Indian sweet, using sugar substitutes. **European Food Research and Technology**, v. 220, n. 2, p. 136-141, 2005.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos - Décimo levantamento**. Brasília DF: 2007. 27 p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Grãos - Sexto levantamento**. Brasília DF: 2008. 33 p.

CORDEIRO, D. S.; RAGHAVAN, G. S. V.; OLIVEIRA, W. P. Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* Leaves. **Biosystems Engineering**, Towcester, v. 94, n. 2, p. 221-228. 2006.

CORRÊA, P. C.; JÚNIOR, P. C. A.; ANDRADE, E.T. Modelagem matemática da atividade de água em polpa cítrica peletizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 283-287. 2001.

CORRÊA, P. C.; JÚNIOR, P. C. A.; STRINGHETA, P. C.; CARDOSO, J. B. Equilíbrio higroscópico e atividade de água para ovo integral processado em "Spray Dryer". **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 15-22. 2002.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas MG, v. 4, n. 1, p. 126-134. 2005.

CORRÊA, P. C.; JÚNIOR, P. C. A.; RIBEIRO, D. M.; SILVA, F. Equilíbrio higroscópico de milheto, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 162-167. 2006.

COULTATE, T. P. **Food: The Chemistry of its components**. Series fo the Royal Society of Chemistry Paperbacks, 3rd edition, London, Royal Society of Chemistry, 1996. p.321-339.

DITCHFIELD, C. **Estudo dos métodos para medida da atividade de água**. 2000. p.195. Mestrado em Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Química, São Paulo SP.

FALADE, K. O.; CHIME, J.J.; OGUNWOLU. Water sorption isotherms and heat of sorption of cashewnuts pretreated by different methods. **Food, Agriculture and Enviroment**, v. 2, n. 2, p. 83 - 87, 2004.

FADINI, A. L.; SILVA, P. M. P.; JARDIM, D. C. P.; VISSOTO, F. Z.; QUEIROZ, M. B. Isotermas de sorção de umidade e estudo de estabilidade de macadâmias drageadas. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas SP, v. 9, n. 2, p. 83-88, 2006.

FERREIRA, C. D.; PENA, R. S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Revista Ciência e Tecnologia dos alimentos**, Campinas - SP, v. 37, n. 2, p. 251-255, 2003.

FRANCISCO, F. G.; USBERTI, R.; TONELI, J. T. C. L. Ajuste de isotermas de sorção de sementes de cultivares de feijoeiro. **Revista Brasileira de Sementes**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 35-39, 2007.

FREITAS, C. A.; FILHO, A. L. M. Evolução recente do desempenho da rizicultura no mercado mundial e nos países do mercosul, período 1990 a 2004. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa MG, v. 32, n. 1, p. 58-69, 2007.

FONSECA, J. R.; PEREIRA, J. A.; SILVA, S. C.; RANGEL, P. H. N.; BRONDANI, C. **Resgate de arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.) nos estados da Paraíba e Ceará**. Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás GO. 2006. 4p.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14ª Edição. Piracicaba SP: Universidade de São Paulo, 2000. 478p

GOMES, P. M. A.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Caracterização e isotermas de adsorção de umidade da polpa de Acerola em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n. 2, p. 157-165, 2002.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; NOGUEIRA, B. L.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática do equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz em casca obtido pelos métodos estático e dinâmico. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa MG, v.32, n. 2, p. 152-260, 2007.

GRISI, C. **Controle de Atividade da Água**. Fórum Pet Food. São Paulo SP: 2002. 26 p.

IGUAZ, A.; VIRSEDA, P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. **Journal of Food Engineering**, London, v. 79, p. 794-802, 2007.

ITO, A. P. **Determinação de condutividade e difusividade térmica de grãos de soja**. 2003.115. Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas SP.

JAYAS, D. S.; MAZZA, G. Comparison of five, three-parameter equations for the description of adsorption data of oats. **American Society of Agricultural Engineers, Transactions of ASAE**, Fayetteville, v. 36, n. 1, p. 119-125, 1993.

KOUHILA, M.; BELGHIT, A.; DAUGUENET, M.; BOUTALEB, B. C. Experimental determination of the sorption isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*). **Journal of Food Engineering**, London, v. 47. n. 1, p. 281-287, 2001.

LABUZA, T. P.; KAAUANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. **Journal of Food Science**. London, v.50, p. 385-391, 1985.

LIMA, G. A. S. **Arroz em casca**. Fortaleza CE: Companhia Nacional do Abastecimento – CONAB. 2006. 6p.

LEHN, D. N.; PINTO, L. A. de A. Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa MG, v. 12, n. 3, p. 177-191, 2004.

- LUZ, C.A.S.; PESKE, S.T. Secagem de sementes de arroz em secador intermitente lento. **Revista Brasileira de Sementes**, São Paulo, v.10, n.2, p.103-114,1988.
- MARCHEZAN, E.; MENEZES, N. L.; SIQUEIRA, C. A. Controle da qualidade das sementes de arroz irrigado utilizadas em Santa Maria /RS. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria - RS, v. 31, n. 3, p. 375-379, 2001.
- MATOS, A. T.; CORRÊA, P. C.; FINGER, F. L. Higroscopia das folhas e películas externas de bulbos da cebola (*Allium cepa* L.). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal SP, n. 2, p. 81-91, 1998.
- MESQUITA, J. B.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C. Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo de copaíba. **UFC. CERNE**. São Cristóvão - SE. v. 7, n. 2, p. 12-21, 2001.
- MORAGA, G.; NAVARRETE, N, M.; CHIRALT, A. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: Influence of pretreatment. **Journal of Food Engineering**. Valencia – Spain, v. 62, n. 1, p. 315-321, 2003.
- MOTTA, W. A.; VILLELA, F. A.; ZIMMER, G. J. Adaptação do método contínuo de secagem para sementes de arroz. **Revista Scientia Agrícola**, v. 56, n.4, p.1019-1025, 1999.
- MOURA, R. S. F.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SOUSA, A. G.; SILVA, M. M.; OLIVEIRA, A. M. V. Modelagem matemática para isoterma em polpa de caju. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 4. n. 2, p. 18-29, 2004.
- MULET, A.; GARCIA-PASCUAL, P.; SANJUAN, N.; GARCIA-REVERTER, J. Equilibrium Isotherms and isotheric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, London, v.53, p. 75-81, 2002.
- OZTEKIN, S.; BASÇETINÇELİK, A.; SOYSAL, Y. Crop drying program in Turkey. **Renewable Energy**, Kidlington, v.16, n.3, 1999. p.789-794.
- PALACIN, J. J. F.; FILHO, A. F. L.; CECON, P. R.; MONTES, E. J. M. Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico de milho (*Zea mays* L.) nas espigas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa MG, v.31, n. 2, p. 197-205, 2006.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Revista Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, Campinas SP, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001a.
- PARK, K. J.; SANDRINI, D.; BROD, F. P. R.; NUNES A. S. Isotermas de dessorção para *Melissa officinalis*: Determinação experimental e modelagem matemática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal SP, n. 1, p. 91-100, 2001b.
- PEREIRA, J. A.; BASSINELLO, P. Z.; FONSECA, J. R.; RIBEIRO, V. Q. Potencial genético de rendimento e propriedade culinárias do arroz-vermelho cultivado. **Revista Caatinga**, UFERSA, v. 20, n. 1, p. 43-48, 2007.
- PEREIRA, J. A.; RAMOS, S. R. R. **Cultura do arroz-vermelho (*Oryza sativa* L.) no Brasil**. Teresina PI: Embrapa Meio-Norte, 2004. 6 p.
- PLANETA ARROZ, Arroz-vermelho: de vilão a bênção. **Revista Planeta Arroz**, Cachoeira do Sul RS, ano 5, ed. 17, p. 29-31, mar. 2005.
- RANGEL, P. H. N.; BRONDANI, C.; FONSECA, J. R.; SILVA, S. C.; RABELO, R. R.; PEREIRA, J. A.; EMÍLIO, P. **Parentes silvestres das espécies cultivadas: Mapeamento da distribuição geográfica das espécies brasileiras de *Oryza*, com vistas à conservação dos parentes silvestres e das variedades crioulas de arroz (*O. sativa* L.)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 44p.

- RAMOS, S. R. R.; PEREIRA, J. A.; SOBRAL, P. V. C. **Divergência genética entre variedades tradicionais de arroz-vermelho para região Nordeste do Brasil**. Embrapa Meio-Norte. Teresina PI. 2006. 4p.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. Isotermas e calor isostérico de dessorção do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa MG, v.31, n. 1, p. 86-94. 2006a.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotermas e Calor Isostérico de Sorção do Feijão. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, Campinas, v.26, n. 3, p. 626-631. 2006b.
- RIZVI, S. S. H. **Thermodynamic properties of foods in dehydration**. Cornell University, Ithaca, New York. 1987. 502p.
- ROCKLAND, L. B.; BEUCHAT L. R. **Water Activity: Theory and Applications to food**. Institute of food technologists 221n. Lasalle st. Chicago Illinois, 1987. 664p.
- ROSA, O.S. **Temperaturas recomendadas para a secagem de sementes de trigo e arroz utilizando o método intermitente**. Seminário Panamericano De Semillas, 5. Macaray,1966. Anais. Macaray, 1966. 27p.
- ROSSI, J. S.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. Academia de ciências do Estado de São Paulo: n. 22. 1980. 296p.
- SANTOS, A. B.; PRABHU, A. S.; PINHEIRO, B. S.; FERREIRA, C. M.; FERREIRA, E.; FONSECA, R. J.; BARRIGOSI, J. A. F.; SILVA, J. G.; STONE, L. F.; FAGEIRA, N. K.; RANGEL, P. H. N.; RABELO, R. R.; SILVA, S. C.; COBUCCI, T.; CUTRIM, V. A. **Arroz Irrigado: Recomendações técnicas para o estado do Tocantins**. Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás GO. 2002. 25p.
- SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura do arroz no Brasil**. 2 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 312p.
- SILVA, F.; PARK, K.J.; MAGALHÃES, P. M. Isotermas de dessorção de *Calendula officinalis* L.: determinação experimental e modelagem matemática. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v.9, n.1, p. 21-28, 2007.
- SILVA, J. S.; BERBERT, P. A.; AFONSO, A. D. L.; RUFATO, S. Qualidade dos grãos. In: **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa MG: Aprenda Fácil. 2000a. Cd-rom.
- SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e Secadores. In: **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa MG: Aprenda Fácil. 2000b. Cd-rom.
- SILVA, M. M.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, M. M. Demanda energética envolvida no processo de dessorção de umidade em polpa de manga. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.2, p.107-117, 2002.
- SOARES, L. A. de S.; GONÇALVES, A. A.; FURLONG, E. B. **Digestibilidade das Fibras Alimentares presentes em Biscoitos de Aveia contendo Farelo de Arroz e Plasma Bovino**. In: Simpósio em Ciência de Alimentos - Alimentos e Saúde, 2001, Florianópolis - SC. 2001. p. NU 3-NU 3.
- SOUZA, G. S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Embrapa SPI/Embrapa SEA: Brasília, 1998. 505p.
- TEMUDO, M. P. A escolha do sabor, o saber da escolha. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 19, n. 4, p. 21-24. 1996.
- TONELI, J. T. C. L.; PARK, K. J. P.; MURR, F. E. X.; NEGREIROS, A. A. Efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção de concentrado de inulina em pó obtido a partir de raízes de chicória. **Revista Brasileira de Armazenamento, Centreinar**. Viçosa MG, v.32, n. 2, p. 128-140. 2007.

VASCONSELOS, L. H. **Determinação das propriedades físicas da canola (*Brassica Nouns*), variedade Iciola 41, relacionadas a armazenagem.** 1998. 113. Mestrado em Engenharia Agrícolas. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas SP.

VIEIRA, H. A.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Isotermas de adsorção de umidade da pitanga em pó. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande PB, v. 7, n.1, p. 11-20, 2007.

APÉNDICE

APENDICE A



FIGURA 1A – Pesagem diária dos recipientes de sorção com amostras de arroz-vermelho variedades PB01 e PB05 para os experimentos de adsorção e dessorção.

APENDICE B

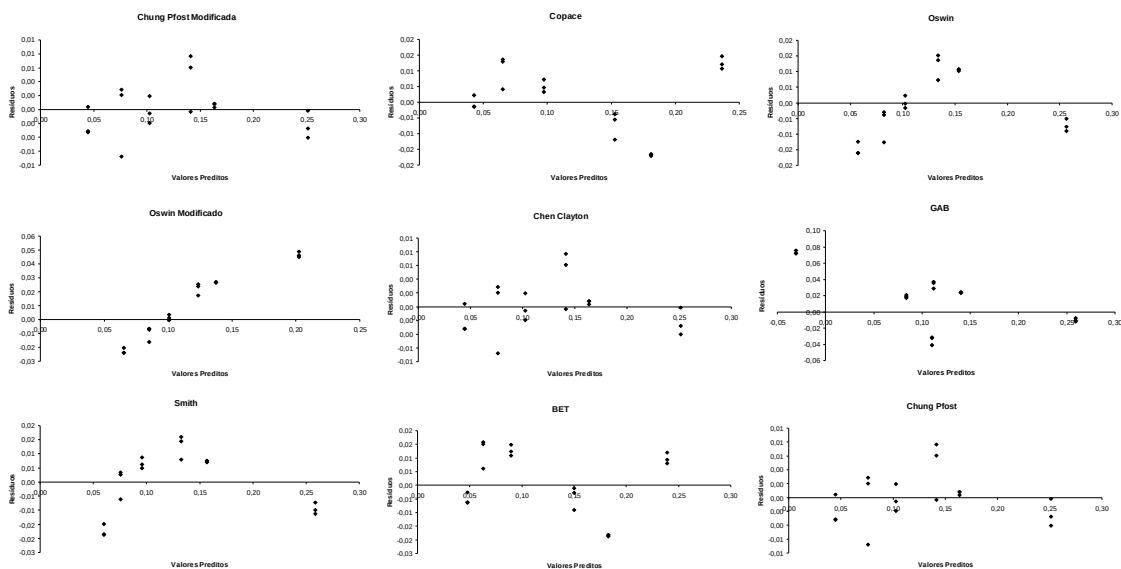


FIGURA 1B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 30 °C.

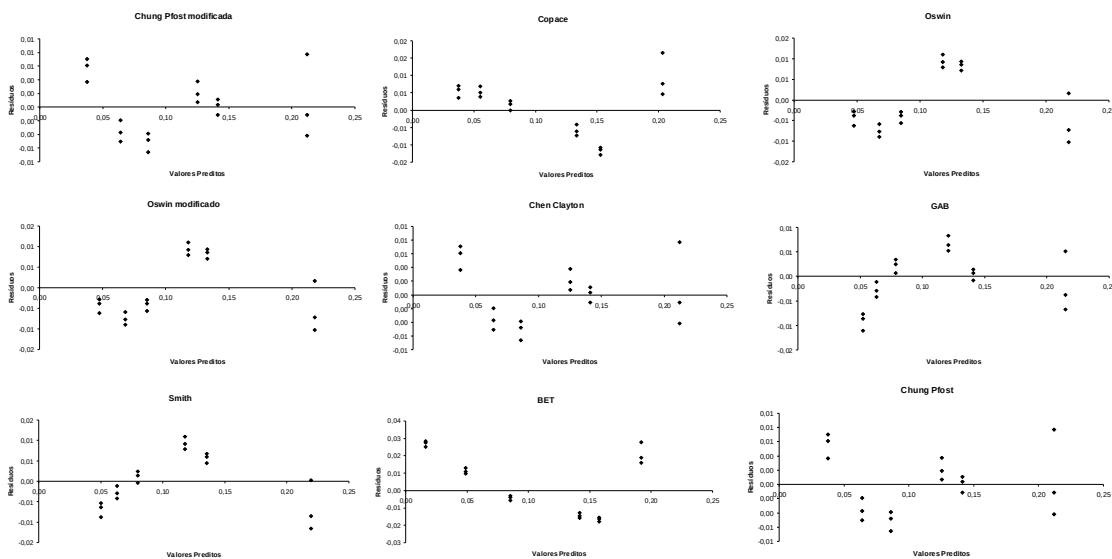


FIGURA 2B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 50 °C.

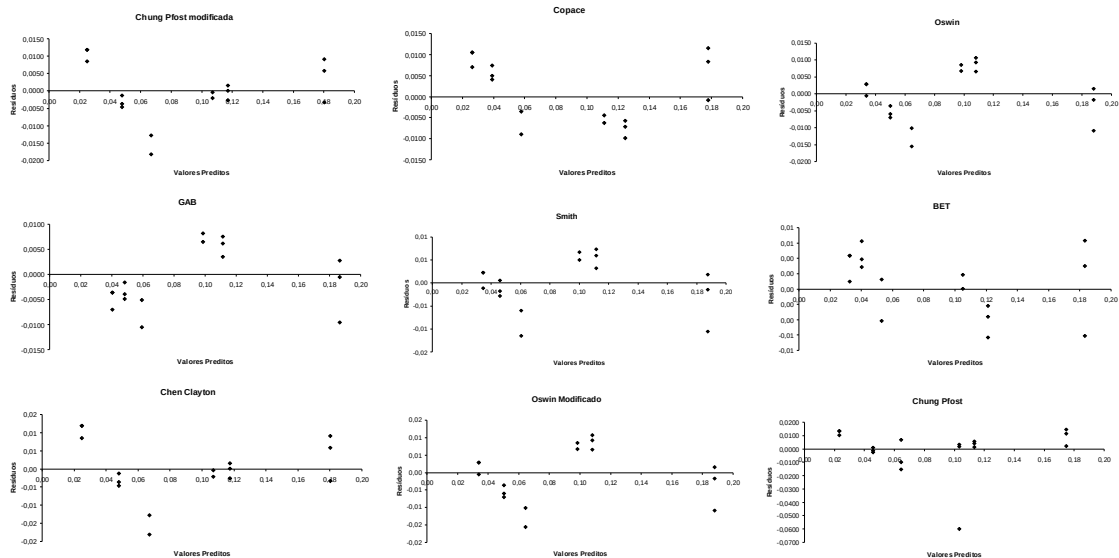


FIGURA 3B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção a 70 °C.

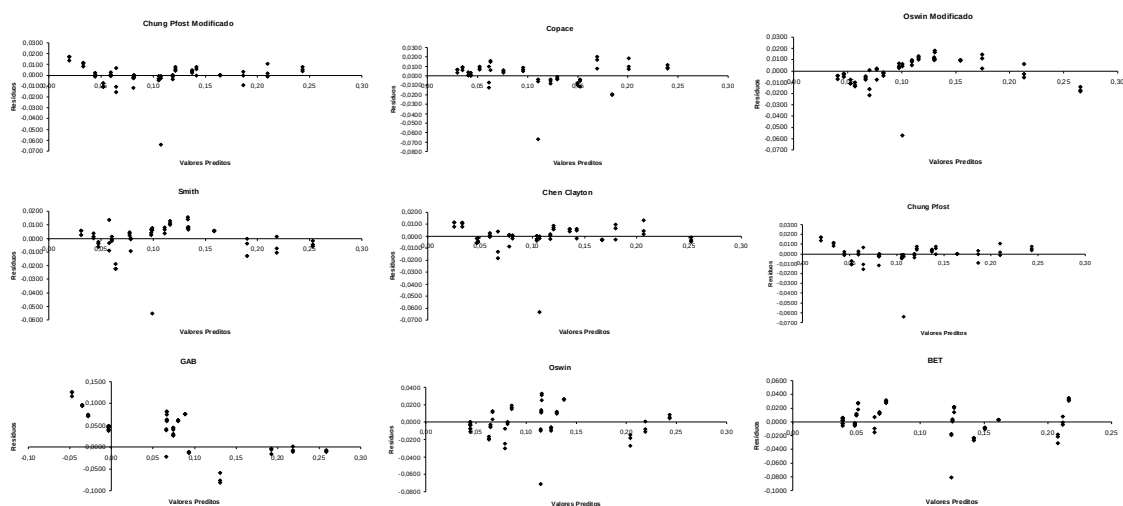


FIGURA 4B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de adsorção no intervalo de temperatura 30 a 70 °C.

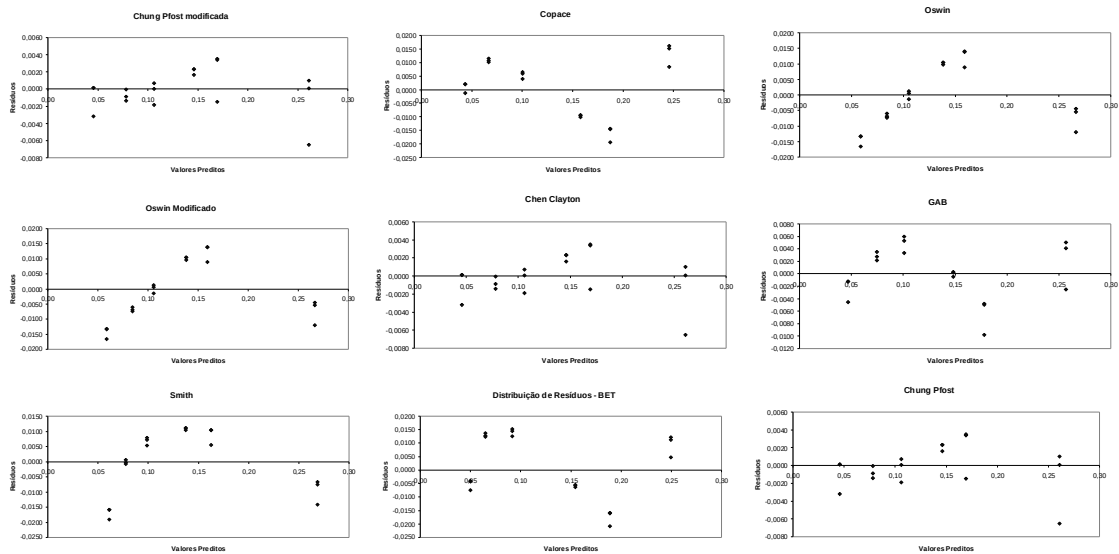


FIGURA 5B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 30 °C.

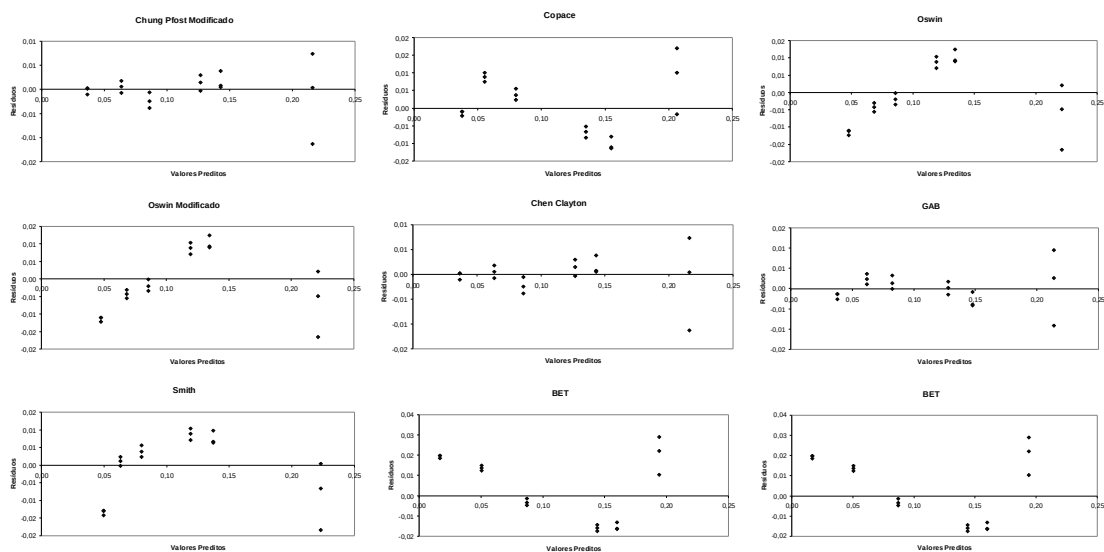


FIGURA 6B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 50 °C.

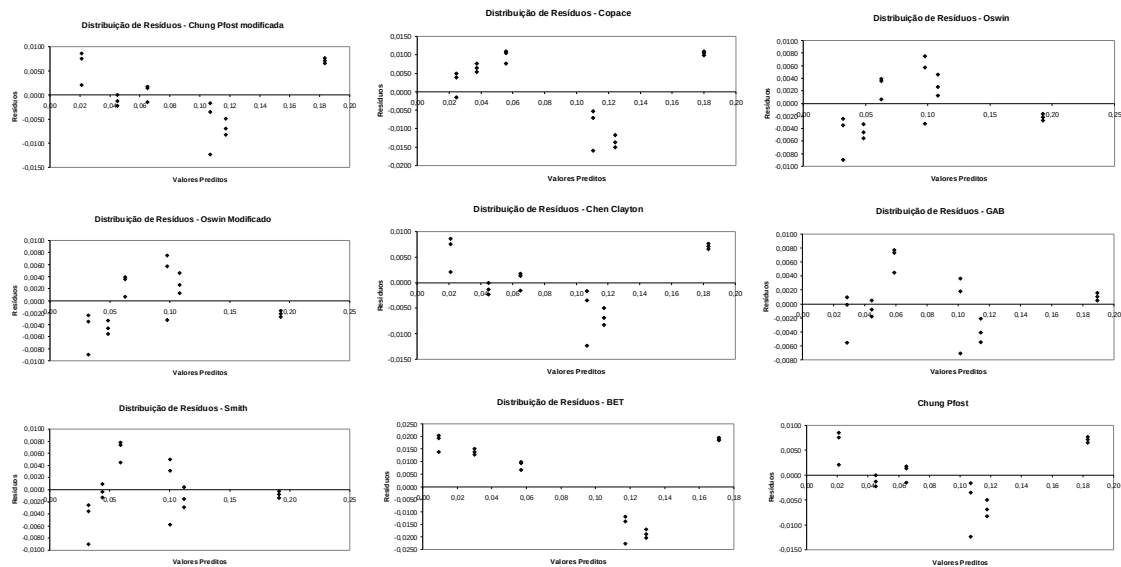


FIGURA 7B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção a 70 °C.

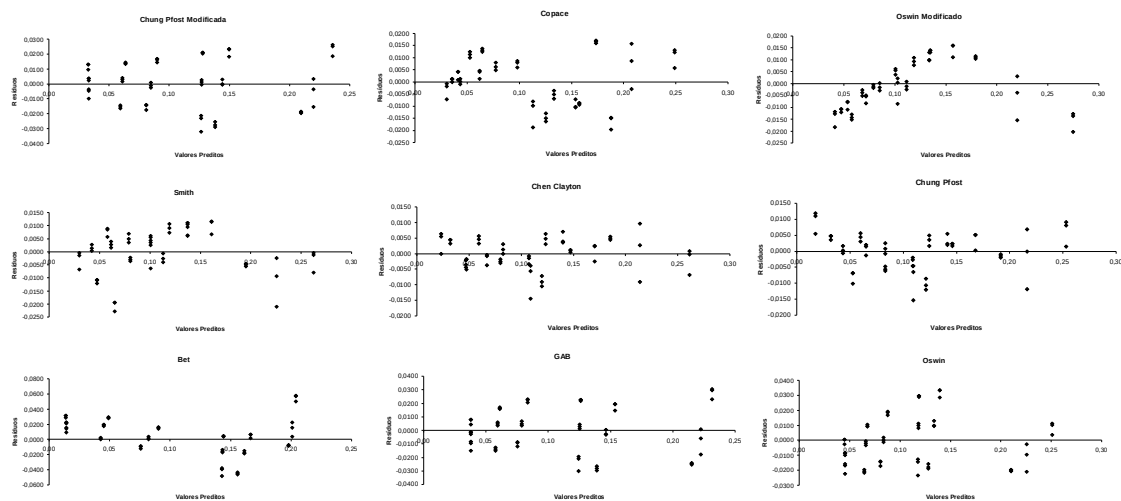


FIGURA 8B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de adsorção no intervalo de temperatura °C.

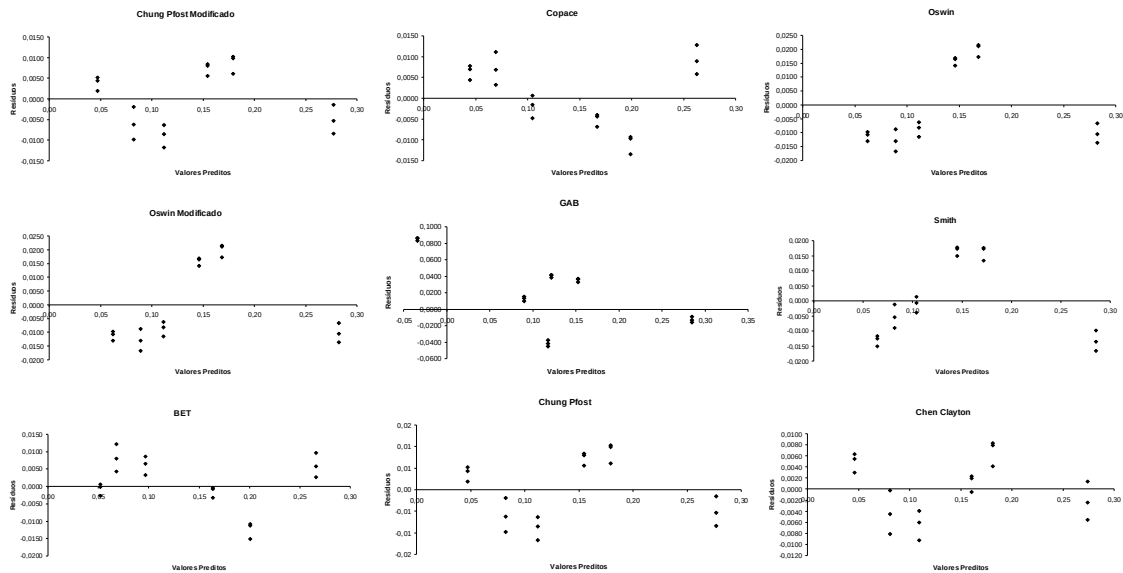


FIGURA 9B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 30 °C.

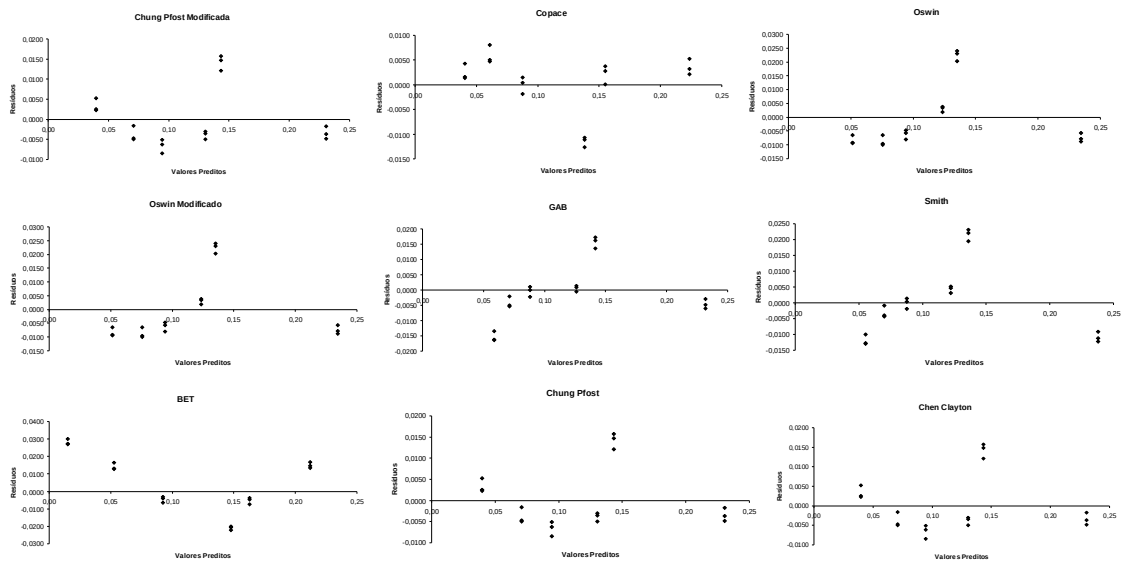


FIGURA 10B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 50 °C.

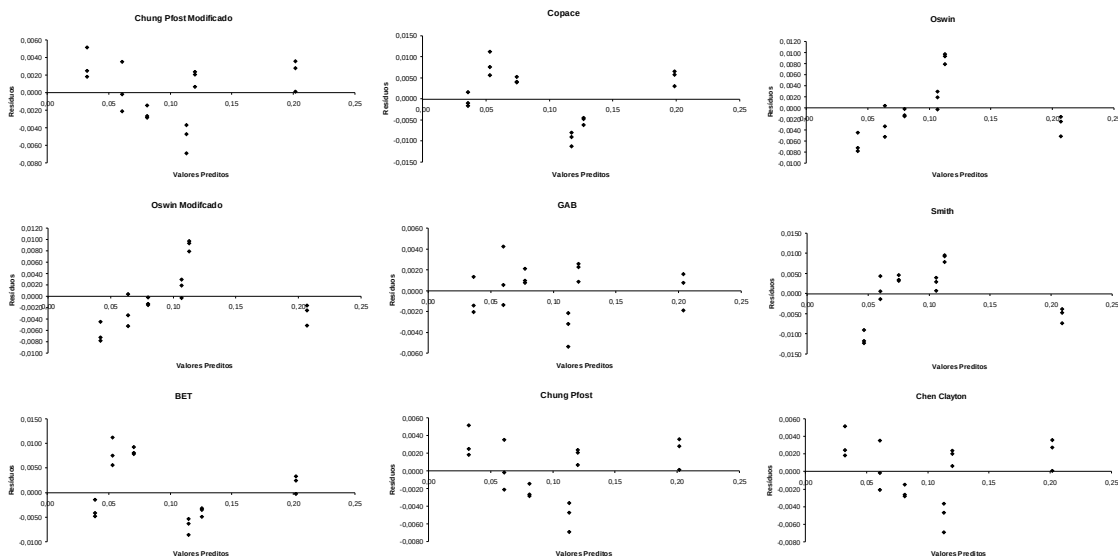


FIGURA 11B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção a 70 °C.

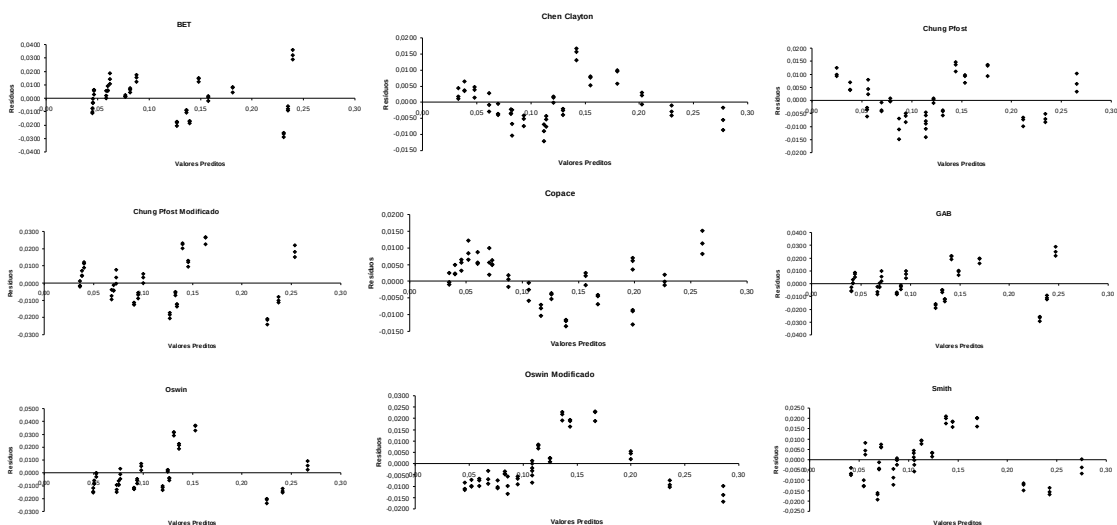


FIGURA 12B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB01 no processo de dessorção no intervalo de temperatura °C.

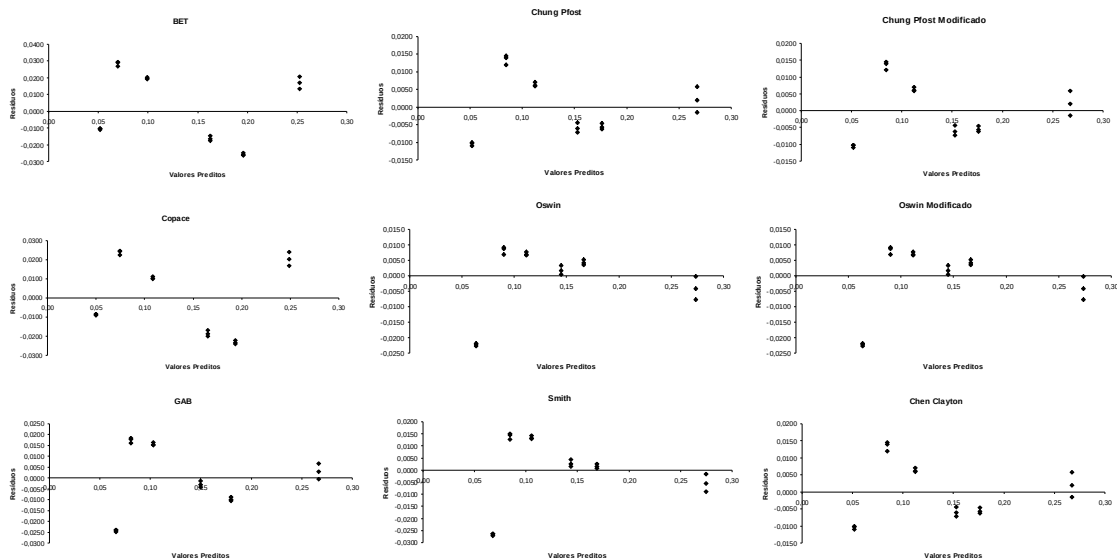


FIGURA 13B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 do processo de dessorção à 30 °C.

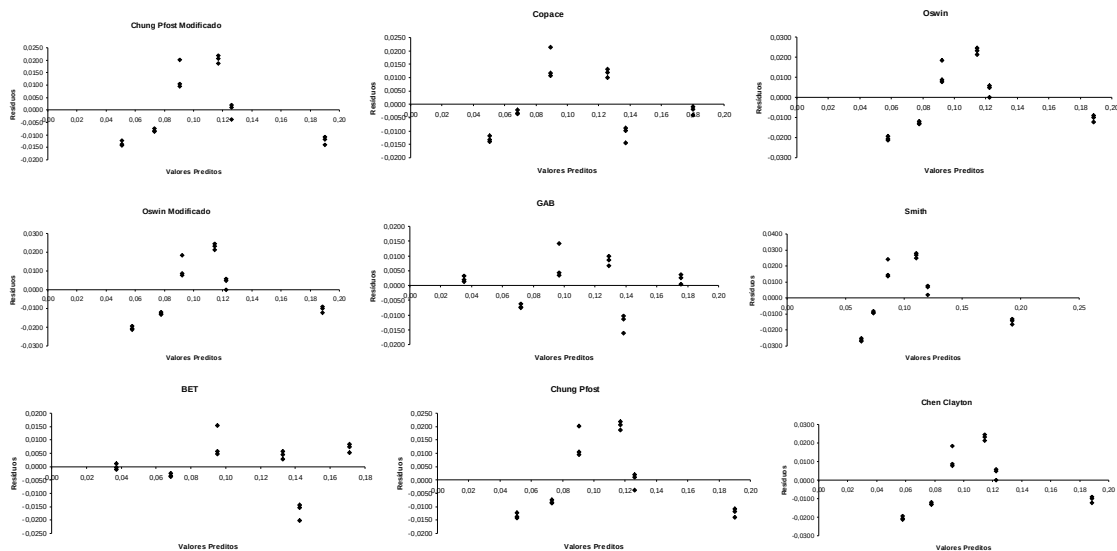


FIGURA 14B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção à 50 °C.

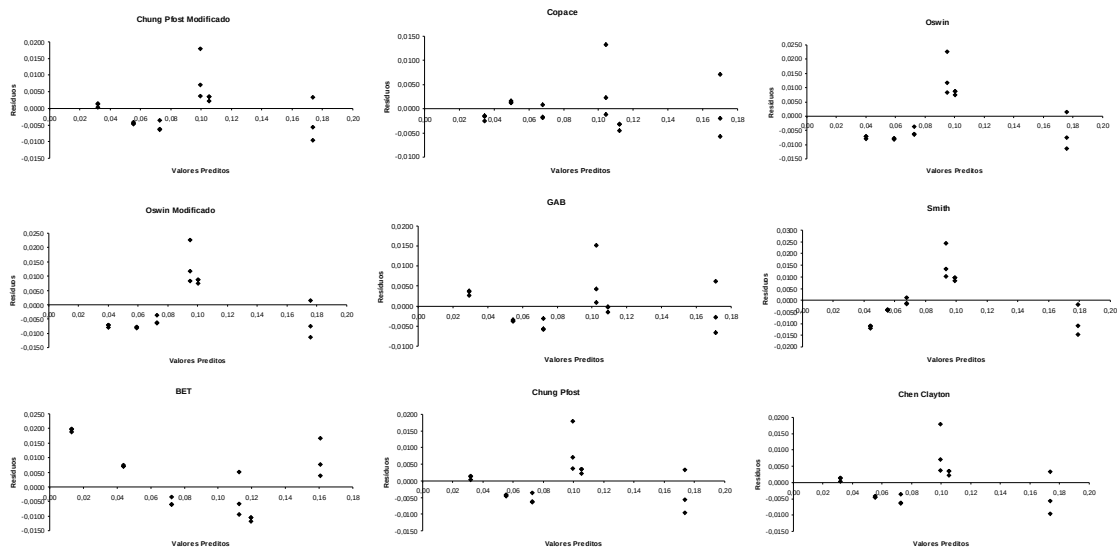


FIGURA 15B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção à 70 °C.

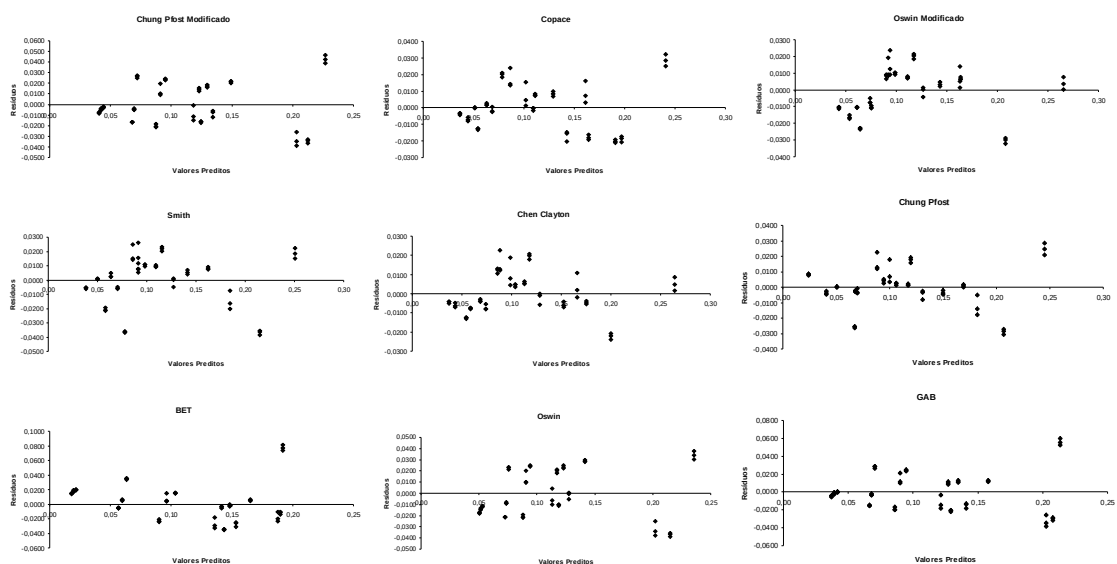


FIGURA 16B - Distribuição de resíduos dos modelos da variedade PB05 no processo de dessorção no intervalo de temperatura °C.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)