

José Holanda Campelo Júnior 2/

Nicolau Priante Filho 3/

Maria Cristina de F. e Albuquerque 2/

Artamízia Maria N. Montezuma 2/

João Moreira Batista 2/

Marlene M. Del Duccas Mendonça 3/

Clayton Campanhola 2/

Carlos Rinaldi 3/

José Roberto Schmaltz 4/

Gutemberg Carvalho Silveira 5/

Carlos Caneppele 5/

Elizabeth A. Furtado de Mendonça 5/

Paulo Martins da Silva 5/

Alício Nunes Domingues 5/

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é fornecer uma apresentação gráfica de uso prático do equilíbrio higroscópico baseado na teoria do potencial da água. A metodologia de cálculo baseou-se no modelo simplificado de equilíbrio higroscópico descrito por CAMPELO JÚNIOR (2). As curvas correspondentes a diversas umidades de arroz, milho, soja, assim como de potenciais escolhidos arbitrariamente foram locadas em gráficos psicrométricos. Uma das informações práticas obtidas a partir dos gráficos é a de terminação do aumento de temperatura para secagem de grãos em silos ou barcaças a baixas temperaturas. Verificou-se que as umidades indicadas para armazenagem de arroz, milho e soja correspondem ao potencial de -127 atm.

1/ Subvencionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

2/ Professores do Departamento de Agronomia/CCA/FUFMT - 78.000 - Cuiabá MT, Brasil.

3/ Professores do Departamento de Física/CCET/FUFMT - 78.000 - Cuiabá MT, Brasil.

4/ Estagiário do Departamento de Matemática/CCET/FUFMT - 78.000 Cuiabá MT, Brasil.

5/ Estagiários do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem/CCA/FUFMT 78.000 Cuiabá MT, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O método mais utilizado para preservação de produtos agrícolas é a secagem, por ser o de maior operacionalidade e menor custo.

A diminuição do teor de umidade dos produtos agrícolas permite armazenagem, com redução acentuada das perdas inerentes ao seu metabolismo ou decorrentes do ataque de fungos e insetos.

O conhecimento dos princípios envolvidos no processo de transferência de vapor d'água entre estes produtos e o ar ambiente tem consequência fundamental no processamento pós-colheita.

A umidade de equilíbrio de um material é definida como sendo seu conteúdo de umidade após o mesmo ter permanecido exposto a uma determinada condição ambiental por um período de tempo infinitamente longo.

O estabelecimento de curvas de umidade de equilíbrio para cada produto permite quantificar o teor de umidade indicado para sua armazenagem, fornecer parâmetros utilizados na previsão da velocidade de transferência de vapor na secagem, estimar os níveis de desorção numa determinada condição ambiental e é fundamental na avaliação da taxa de deterioração do material.

Em que pese ter sua importância reconhecida na secagem e armazenamento, o equilíbrio higroscópico tem sido apresentado em equações ou gráficos que pela sua complexidade, dificultam seu manuseio prático.

A literatura apresenta valores experimentais de teor de umidade de equilíbrio para grande parte dos produtos agrícolas (1).

Os modelos mais simples de equilíbrio higroscópico, como os de HENDERSON (5) e CHUNG e PFOST (3), mostraram-se limitados a determinadas faixas de temperaturas e umidade relativa. O modelo desenvolvido por SINCIO e ROA (7) apresenta bom ajuste aos valores experimentais encontrados na literatura.

A apresentação gráfica das curvas de umidade de equilíbrio tem sido normalmente feita através de isotermas. Entretanto, HALL (4) apresentou o equilíbrio higroscópico de grãos de ervilha em um gráfico psicrométrico.

O modelo simplificado de equilíbrio higroscópico desenvolvido por CAMPELO JÚNIOR (2) apresentou bons resultados numéricos, utilizando dois parâmetros para caracterizar o material.

Pretende-se então, com este trabalho, fornecer uma apresentação gráfica, de uso prático, do equilíbrio higroscópico baseada na teoria do potencial de água na atmosfera.

2. MATERIAL E MÉTODO

Segundo CAMPELO JÚNIOR (2), o potencial de água na atmosfera (Ψ) poder ser expresso pela equação:

$$\Psi = \left\{ 41,3 - C_{pv} \left[\ln \frac{T}{T_0} - (T - T_0) \right] + L_0 \ln \frac{T}{T_0} + C_{pl}(T_0 - 273) \ln \frac{T}{T_0} \right\} \quad (1)$$

e a relação entre a umidade de equilíbrio de um produto (θ) e o potencial de água na atmosfera, pela relação:

$$\theta = a + b \ln |\Psi| \quad (2)$$

onde a e b são parâmetros característicos do produto considerado.

Valores experimentais obtidos por BAKHAREV para arroz, RAMSTAD e GEDDES para soja e LARNMOUR e RODRIGUES-ARIAS para milho citados por BROOKER et alii (1), fornecem as umidades de equilíbrio para diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar. Desta forma, pode-se determinar a temperatura do ponto de orvalho correspondente a cada condição do ar, a partir de TETENS citada por SAUCIER (6):

$$P_{vs} = 4,58 \times 10^{\frac{7,5 \times T_0}{237,5 + T_0}} \quad (3)$$

Os valores da pressão de vapor de saturação (P_{vs}) podem ser extraídos das tabelas ou equações empíricas, (θ).

Calcula-se, pela equação 1, o valor correspondente de Ψ para cada par (T, T_0), referente a uma determinada umidade de equilíbrio de um produto.

Relacionando-se os valores de Ψ calculados com os correspondentes valores de θ , efetuando-se uma regressão simples através da equação 2, encontra-se:

$$\theta = 31,299 - 3,776 \ln |\Psi| \quad \text{para o arroz} \quad (4)$$

$$\theta = 41,57 - 6,09 \ln |\Psi| \quad \text{para a soja} \quad (5)$$

$$\theta = 34,056 - 4,372 \ln |\Psi| \quad \text{para o milho} \quad (6)$$

As equações 4, 5 e 6 foram utilizadas para calcular potenciais de água do ar relativos a diversas umidades de equilíbrio, por produto. Para cada valor de Ψ assim obtido calcularam-se, a partir da equação (1), os valores das temperaturas do ponto de orvalho, para cada temperatura do ar desde 15 até 40°C, com intervalos de 1°C, para este procedimento foi utilizado o programa de cálculo disponível no NTA-CO. Com estes conjuntos de dados foram construídas as curvas de umidade de equilíbrio em gráfico psicrométrico. A construção do gráfico psicrométrico foi feita a partir de dados de TUBELIS e NASCIMENTO (8).

Além das curvas de equilíbrio higroscópico do arroz, milho e soja, o mesmo procedimento de cálculo foi utilizado para locar as curvas com potenciais de água de -20, -50, -100, -200, -300, -400, -500, -600, -700 atm, as quais podem ser utilizadas para outros produtos, desde que se conheçam as respectivas relações entre a umidade de equilíbrio higroscópico e o potencial de água na atmosfera.

A inclinação (γ) das linhas de entalpia do gráfico psicrométrico, segundo BROOKER et alii (1), obtido pela relação:

$$\gamma = A \cdot P \quad (7)$$

3. RESULTADOS

O Quadro 1 mostra valores dos potenciais de água na atmosfera calculados a partir das equações 4, 5 e 6 para umidades de equilíbrio higroscópico do arroz, milho e soja.

As curvas de umidades de equilíbrio das Figuras 1, 2 e 3 foram obtidas locando-se em gráficos psicrométricos os pares (T , T_0).

Procedimento análogo foi adotado para a construção das curvas da Figura 4, onde as mesmas correspondem a valores arbitrários de potencial de água na atmosfera, podendo ser utilizadas para quaisquer produtos.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

As curvas de equilíbrio higroscópico locadas nos gráficos psicrométricos Figuras 1, 2, 3 e 4 são curvas de dessecção ou secagem, de acordo com a metodologia utilizada na obtenção dos valores experimentais de umidade de equilíbrio. No caso de absorção de vapor d'água, isto é, umedecimento dos grãos, ocorre o fenômeno da historese, o que reduz o campo de aplicação dos resultados.

A partir do Quadro 1 constatou-se que o potencial de água de -127 atm equivale ao teor de umidade próximo de 13%, recomendado para armazenagem dos produtos agrícolas estudados.

Fato análogo ocorre para solos diferentes, pois embora apresentem diferentes capacidades de retenção de umidade, possuem comportamentos semelhantes quando submetidos a tensões de 1/3 e 15 atm, respectivamente, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, de largo uso em irrigação.

Uma aplicação prática das Figuras 1, 2 e 3 consiste na determinação do aumento de temperatura necessário para promover a secagem de produtos agrícolas até os teores de umidade recomendados para armazena -

gem, conhecidos a temperatura e umidade relativa média do local, quando se trabalha com secagem a baixa temperatura.

A necessidade do aumento de temperatura do ar natural só se verifica quando o ponto que representa as condições do ar natural se situar à esquerda de curva de umidade de armazenamento. Nesse caso o aumento de temperatura é determinado pelo comprimento do segmento de reta horizontal (medido $^{\circ}\text{C}$), limitado pelo ponto e a curva em questão.

5. SUMMARY

The object of this study is to provide a graphic introduction to the practical use of hygroscopic equilibrium based on theory of "water potential". The method of calculation was based on the simplified model of hygroscopic equilibrium described by CAMPELO JÚNIOR (2). Curves corresponding to various humidities of rice, corn, soybeans and some potential chosen at random were located on psicrometric graphs. One practical information from the graphic is the increase of temperature for grains drying in silos, barges at low temperatures. It was observed that the humidity for storage of rice, corn and soybeans correspond to the potential -127 atm.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Matemática da UFMT, pelos trabalhos de computação efetuados.

Ao Departamento de Física da UFMT, pela colaboração prestada pelos seus docentes.

À Jesuina de Oliveira Garcia e Cândida Pedroso de Siqueira pelos trabalhos de datilografia.

Quadro 1 - Potenciais de água na atmosfera calculados para teores de umidade de equilíbrio higroscópico do arroz, milho e soja.

Ψ	Arroz	Milho	Soja
	θ (%)	θ (%)	θ (%)
- 2,5	27,8	30,0	36,0
- 6,9	24,0	25,6	29,8
- 19,9	20,0	21,0	23,4
- 24,9	19,2	20,0	22,0
- 33,9	18,0	18,7	20,1
- 98,2	14,0	14,0	13,6
- 109,0	13,6	13,5	13,0
- 127,2	13,0	12,9	12,1
- 155,2	12,3	12,0	10,8
- 165,8	12,0	11,7	10,4
- 245,3	10,5	10,0	8,1
- 281,6	10,0	9,4	7,2
- 300,0	9,8	9,1	6,8
- 387,5	8,8	8,0	5,3
- 487,3	8,0	7,1	4,0

7. LISTA DE SÍMBOLOS

C_{pv} - calor específico do vapor d'água, a pressão constante,
(cal. g⁻¹ . °C⁻¹)

T - temperatura do ar, (K)

T_o - temperatura do ponto de orvalho, (K)

L_o - calor latente de vaporização da água na temperatura do ponto de orvalho, (cal. g⁻¹)

C_{pl} - calor específico da água, (cal. g⁻¹ . °C⁻¹)

UR - umidade relativa do ar, (%)

P_{vs} - pressão de vapor de saturação do ar, (mmHg)

ψ - Potencial de água na atmosfera, (atm)

a - constante característica de um produto

b - constante característica de um ponto

A - constante psicrométrica, (°C⁻¹)

P - pressão atmosférica do local, (mmHg)

β - inclinação da reta de entalpia constante, no gráfico psicrométrico, (mmHg. °C⁻¹)

e - umidade de equilíbrio de um produto, em porcentagem de base úmida (%).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

1. BROOKER, D. B. BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W. Drying Cereal Grains. Westport, Connecticut, AVI, 1974. 265 p.
2. CAMPELO JÚNIOR, J. H. Modelo simplificado de equilíbrio higroscópico. In: Encontro Nacional de Secagem, 3. Anais, Viçosa, MG, 1981. 218 - 228.
3. CHUNG, D. S. e PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Transation of the ASAE, 10: 552 575, 1967.
4. HALL, C. W. Drying Farm Crops. Westport, Connecticut, AVI, 1957.
5. HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. Agr. Eng. 33: 29 - 31, 1952.
6. SAUCIER, W. J. Princípios de Análises Metereológicas. Ao Livro Técnico, 1969. 462 p.
7. SINÍCIO R. e RDA, G. Curvas de umidade de equilíbrio para 15 produtos agrícolas. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 4 (2): 45,- 55, 1979.
8. TUBELIS, A. e NASCIMENTO, F. J. L. Metereologia Descritiva - Fundamen-
tos e aplicações brasileiras. Nobel, 1980. 374 p.

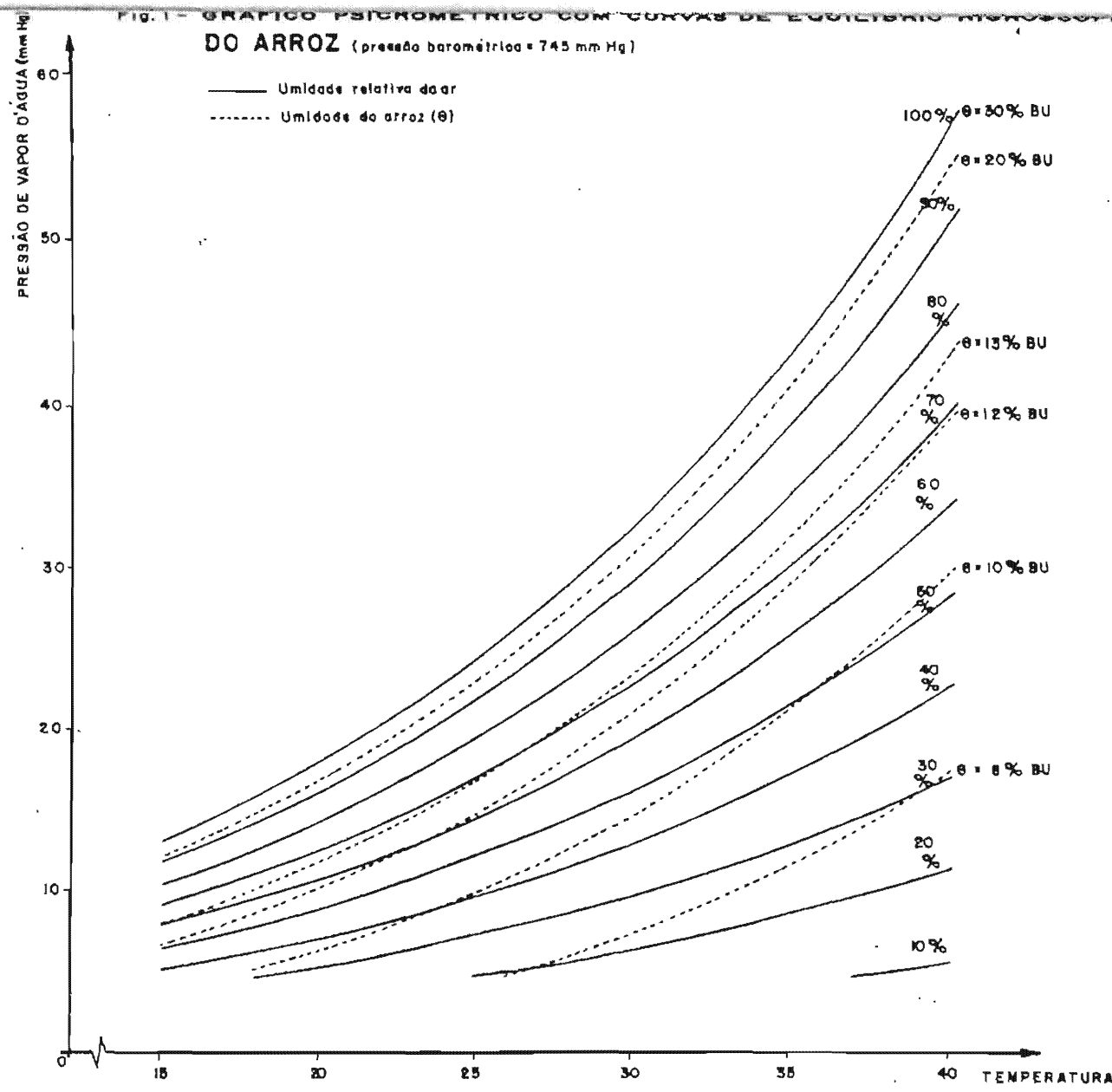
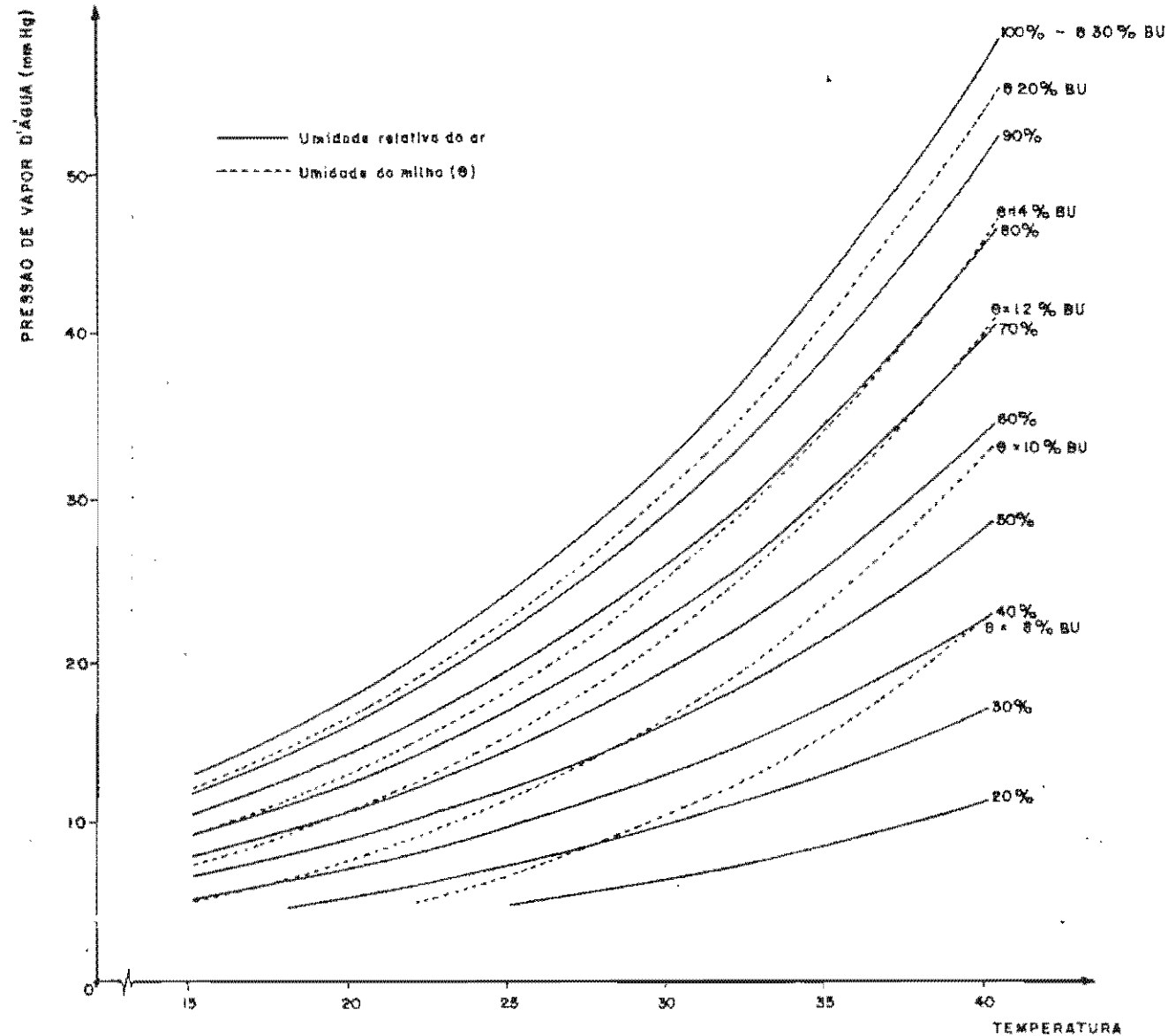


Fig 2 - GRÁFICO PSICROMÉTRICO COM CURVAS DE
EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DO MILHO

(Pressão Barométrica = 745 mm Hg)



**Fig. 3 - GRÁFICO PSICROMÉTRICO COM CURVAS DE
EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA SOJA**

(Pressão Barométrica = 745 mm Hg)

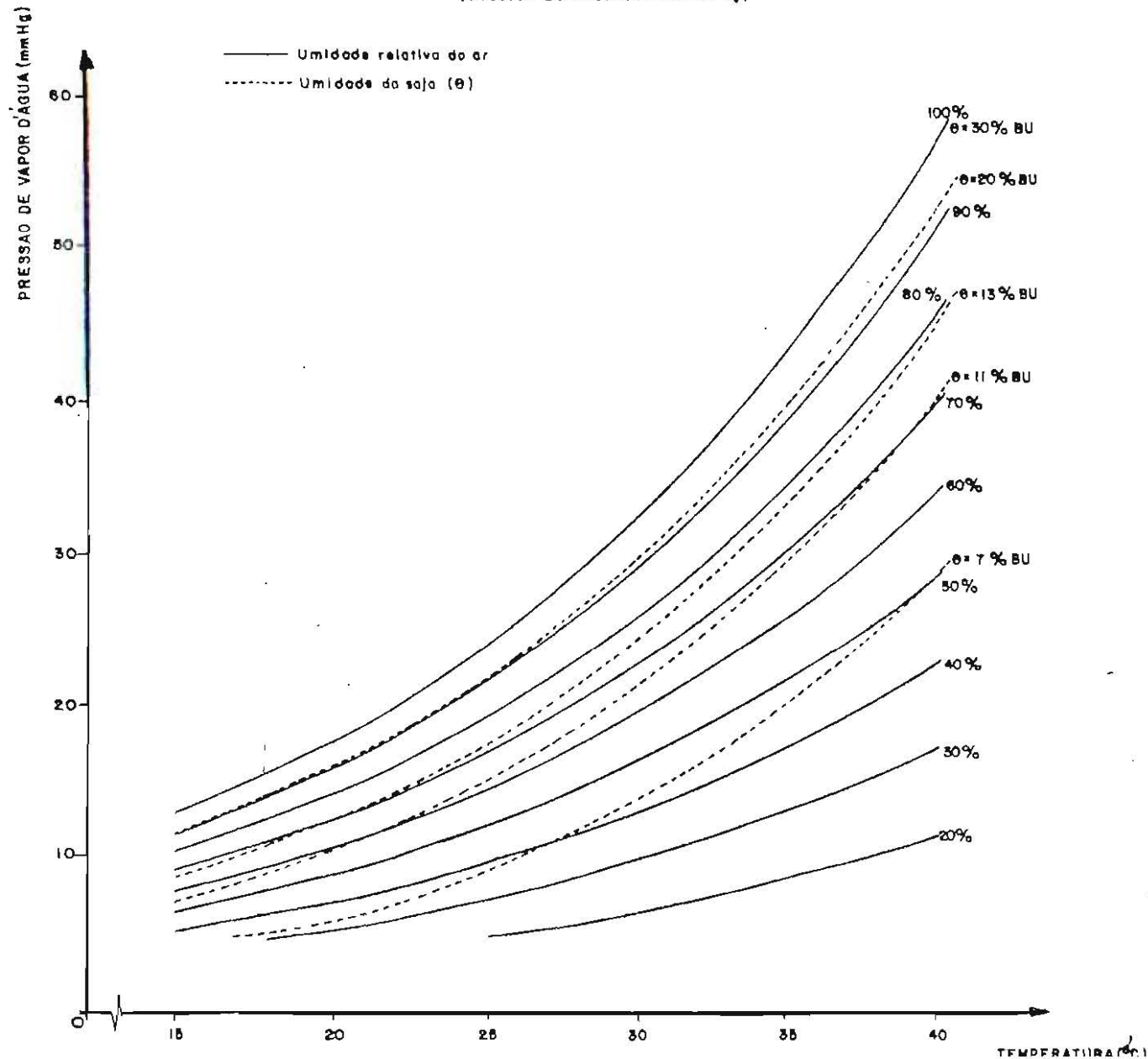


Fig. 4 - GRÁFICO PSICROMÉTRICO COM CURVAS DE
EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO

(Pressão barométrica = 745 mm Hg)

