

PSICRO 2009 – PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES PSI- CROMÉTRICAS DO AR

Ariel Muncio Compagnon*

Ricardo Gava**

Valdecir Antoninho Dalpasquale***

Carlos Humberto Martins****

RESUMO: Este trabalho apresenta um programa computacional para o cálculo das propriedades psicométricas do ar. A determinação das propriedades psicrométricas do ar é uma tarefa frequente para muitos profissionais que projetam sistemas de controle ambiental para plantas, animais e seres humanos. Uma das formas dessas propriedades do ar é o uso de cartas ou gráficos psicrométricos. Sua utilização, embora seja prática, requer demanda de tempo e interpolações visuais, o que pode levar a imprecisão nos dados. Como a determinação das propriedades psicométricas do ar é realizada por meio de expressões que envolvem diversos dados, foi desenvolvido um programa computacional que realiza esses cálculos de forma analítica. O programa computacional foi desenvolvido utilizando-se o *software* Visual Basic que permite uma interface gráfica simples e de fácil uso por diversos profissionais da área.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades Psicométricas; Programa computacional; *Visual Basic*.

PSICRO 2009 – COMPUTER PROGRAM TO DETER- MINE AIR PSYCHROMETRIC QUALITIES

* Engenheiro Agrícola do Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR. E-mail: arielcompagnon@gmail.com

** Engenheiro Agrícola; Mestrando de Agronomia na Universidade Estadual de Maringá – UEM. E-mail: gava_ricardo@yahoo.com.br

*** Docente na Universidade Estadual de Maringá – UEM. E-mail: valdecir.dalpasquale@gmail.com

**** Docente na Universidade Estadual de Maringá – UEM. E-mail: chmartins@uem.br

ABSTRACT: A computer program which calculates air psychometric properties is provided. The determination of air psychometric properties is a frequent task for many professionals who project systems for the environmental control of plants, animals and humans. Air psychometric properties may be taken on psychometric graphs and charts whose use, albeit practical, requires much time and many visual interpolations with data imprecision. Since air psychometric properties are undertaken by formulas with several data, a computer program has been developed for their analytic calculation. Current computer program makes use of the software Visual Basic with simple graphic interface, easily operated by professionals.

KEYWORDS: Air Psychometric Properties; Computer Program; Visual Basic.

INTRODUÇÃO

O ar atmosférico é composto por uma mistura de gases, vapor d'água e contaminantes, como fumaça e poeira (LOPES et al., 2000). Seus valores variam em função dos elementos climáticos, como temperatura e pressão. O estudo dessas misturas é denominado psicrometria ou higrometria (ZOLNIER, 1994).

A determinação das propriedades psicrométricas do ar é uma tarefa frequente para muitos profissionais da área agrícola. É de fundamental importância para projetar sistemas de controle ambiental para plantas, animais e seres humanos.

As pesquisas sobre psicrometria são realizadas utilizando-se um instrumento denominado psicrômetro, que é um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, este último coberto por um tecido imerso em água, preferencialmente destilada.

As propriedades do ar estão relacionadas à temperatura, à quantidade de vapor de água, ao volume ocupado pelo ar e à energia nele contida (LOPES et al., 2000).

Uma das formas de determinação das propriedades psicrométricas do ar é com o uso de cartas ou gráficos psicrométricos. Sua utilização, embora prática, requer demanda de tempo e interpolações visuais, o que pode levar a imprecisão nos dados.

Com o avanço da tecnologia e a necessidade de obter os valores das propriedades psicrométricas do ar, a implementação da computação tornou-se uma realidade.

A partir da última década, com o rápido avanço da computação e com o apa-

recimento de compiladores de uso mais ‘familiar’ ao usuário (ambiente *Windows*, por exemplo), os programas computacionais deixaram de ter sua entrada e saída de dados feita através de arquivos de entrada ou saída de dados tipo texto.

O *Visual Basic 6.0* é um *software* que permite ao programador criar programas para o ambiente *Windows* e foi utilizado para o desenvolvimento deste programa computacional para determinação das propriedades psicrométricas do ar.

Como a determinação das propriedades psicrométricas do ar é realizada por meio de cálculos que envolvem vários dados, surge a necessidade do uso de um programa computacional que realize esses cálculos, agilizando o processo de análise e apresentando uma interface gráfica simples, porém com todas as informações necessárias ao usuário.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 PSICROMETRIA

O estudo e o conhecimento da psicrometria são fundamentais, pois o beneficiamento de produtos agrícolas depende, e muito, do conhecimento das características do ar (WEBER, 2005). As dez propriedades psicrométricas tratadas são discutidas a seguir.

2.1.1 Temperatura de Bulbo Seco

A temperatura de bulbo seco é a temperatura medida com um termômetro, ou com um sensor comum. Caso o termo temperatura seja utilizado sem especificação deve-se entender como sendo a temperatura de bulbo seco (LOPES et al., 2000).

2.1.2 Temperatura do Ponto de Orvalho

Segundo Zolnier (1994), a temperatura de ponto de orvalho é a temperatura na qual o vapor de água começa a se condensar por um processo de resfriamento, mantendo-se constantes a pressão de vapor e a razão de mistura. A *American Society of Agricultural and Biological Engineering* – ASABE (2008), propõe a utilização da equação 1 para determinar a temperatura de ponto de orvalho:

$$(1) \quad T_{po} = 33,38269(P_v^{0,2226162}) + 7,156019 * \ln(P_v) - 26,39589$$

em que:

T_{po} : Temperatura do ponto de orvalho, °C;

P_v : Pressão de vapor, kPa.

2.1.3 Pressão de Vapor e Pressão de Vapor de Saturação

Os átomos e moléculas em um sólido não se movem em relação aos outros, apenas vibram. Quando um sólido é aquecido as suas partículas vibram com mais intensidade. No caso do gelo, as moléculas de água, à medida que são aquecidas, se movem cada vez mais violentamente, chegando a se libertarem de suas posições fixas e criando grupos de moléculas que se movem aleatoriamente. Quando isto acontece diz-se que o gelo derreteu e se transformou em água líquida. Algumas moléculas se movem com velocidades tão altas que escapam do campo de atração com as outras moléculas e entram na atmosfera. Estas moléculas constituem o vapor de água e exercem uma pressão no ambiente conhecida como pressão de vapor de água ou pressão parcial de vapor de água (NAVARRO; NOYES, 2001).

Se uma determinada quantidade de água líquida preencher um recipiente com ar, algumas moléculas de água se moverão para a atmosfera batendo na superfície do recipiente e voltarão ao líquido. Depois de um tempo, o número de moléculas que retornam ao estado líquido é igual ao número de moléculas em estado gasoso e o sistema estará em equilíbrio. Quando isto acontece diz-se que o espaço sobre o líquido está saturado e o vapor de água exerce a pressão de saturação (NAVARRO; NOYES, 2001). Ou seja, quando o ar contém o máximo de vapor de água permissível diz-se que o ar se encontra saturado e a pressão de vapor nessa circunstância é dita máxima ou de saturação. Ressalta-se que a quantidade de vapor que pode existir em uma determinada atmosfera depende da temperatura dessa atmosfera. Temperaturas mais elevadas permitem a existência de maior quantidade de vapor (LOPES et al., 2000).

Segundo Lopes e colaboradores (2000), o vapor de água exerce pressão em todas as direções e essa pressão depende da concentração de vapor. Se a quantidade de vapor não for suficiente para saturar o ar, sua pressão é chamada pressão parcial de vapor ou pressão de vapor. Em caso contrário, é chamada pressão de saturação. A pressão de vapor de saturação pode ser determinada pela equação 2 (ASABE, 2008):

$$P_{vs} = 22105649,25 * \exp \left(\frac{-27405,526 + 97,5413 * T - 0,146244 * T^2 + 0,00012558 * T^3 - 0,000000048502 * T^4}{4,34903 * T - 0,0039381 * T^2} \right)$$

(2)

em que:

 P_{vs} : Pressão de vapor de saturação, Pa;

T: Temperatura de bulbo seco, K.

A pressão de vapor pode ser determinada por meio da equação 3 (WILHELM, 1976) ou por meio da equação 4 (ASABE, 2008):

$$P_v = \frac{P_{atm} * RM}{0,62198 + RM} \quad (3)$$

em que:

 P_v : Pressão de vapor, kPa; P_{atm} : Pressão atmosférica, kPa;RM: Razão de Mistura, $\text{kg}_v \text{kg}_{a.s.}^{-1}$.

$$P_v = UR * P_{vs} \quad (4)$$

em que:

 P_v : Pressão de vapor, Pa;

UR: umidade relativa, decimal;

 P_{vs} : Pressão de vapor de saturação, Pa.

2.1.4 Umidade Relativa

A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ambiente e aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura, sendo expressa em porcentagem, ou seja, é a razão entre a pressão parcial de vapor exercida pelas moléculas de água presentes no ar e a pressão de saturação, na mesma temperatura, como mostra a equação 5 (LOPES et al., 2000). Quanto menor a umidade relativa maior será a capacidade do ar em absorver água. No caso de armazenamento de produtos agrícolas, quanto menor a umidade relativa maior será a capacidade de secagem.

$$UR = 100 \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (5)$$

em que:

UR: Umidade relativa, %;

P_{vs} : Pressão de vapor de saturação, kPa;

P_v : Pressão de vapor, kPa.

A equação 5 é a equação 4 rearranjada para avaliar a umidade relativa do ar.

2.1.5 Razão de Mistura, Razão de Umidade ou Umidade Absoluta

A razão de mistura é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco em um dado volume de mistura (LOPES et al., 2000).

Segundo Navarro e Noyes (2001), uma característica de países com climas tropicais é que a razão de mistura da atmosfera varia pouco de dia para dia. Em geral, o valor da razão de mistura aumenta com o acréscimo da temperatura.

A razão de mistura pode ser determinada pela equação 6 (ZOLNIER, 1994):

$$RM = 0,62198 \left(\frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \right) \quad (6)$$

em que:

RM: Razão de mistura, $\text{kg}_v \text{ kg}_{\text{a.s.}}^{-1}$

P_v : Pressão de vapor de saturação, Pa;

P_{atm} : Pressão atmosférica, Pa.

Para a determinação da razão de mistura à pressão de saturação, utiliza-se a equação 3 (NAVARRO; NOYES, 2001), que, rearranjada torna-se:

$$RM_s = \frac{0,62198P_{vs}}{P_{\text{atm}} - P_{vs}} \quad (7)$$

2.1.6 Grau de Saturação

O grau de saturação é a relação entre a razão de mistura atual e a razão de mistura do ar em condições de saturação, à mesma temperatura e pressão, podendo ser determinado por meio da equação 8 (LOPES et al., 2000).

$$G_s = 100 \frac{RM}{RM_s} \quad (8)$$

em que:

G_s : Grau de saturação, %;

RM: Razão de mistura, $\text{g}_v \text{ kg}_{\text{a.s.}}^{-1}$;

RM_s : Razão de mistura à pressão de saturação, $\text{g}_v \text{ kg}_{\text{a.s.}}^{-1}$.

2.1.7 Entalpia

De acordo com Zolnier (1994), a entalpia de uma mistura ar seco e vapor de água é a energia contida no ar úmido, por unidade de massa de ar seco, para temperaturas superiores a uma temperatura de referência. Na prática, considera-se que o conteúdo de energia do ar seco a 0 °C seja zero.

Segundo Navarro e Noyes (2001), quanto maior a temperatura maior será a entalpia. Quando o ar é aquecido, mantendo-se constante a sua razão de mistura, ocorre variação no calor sensível do ar e o número de graus acrescidos na temperatura será aproximadamente igual ao número de kJ kg^{-1} de ar acrescido na entalpia específica do ar seco. Quando a razão de umidade aumenta mantendo-se

a temperatura constante, ocorre variação no calor latente do ar e a sua entalpia é acrescida de aproximadamente 2,555 kJ kg⁻¹ de ar seco a cada 1 g_v kg_{a.s.}⁻¹ acrescido no ar. Quando, tanto a razão de umidade quanto a entalpia variam, o acréscimo na entalpia é obtido de maneira aproximada, somando-se as variações dos calores sensível e latente do ar. A entalpia pode ser determinada pela equação 9 (ASABE, 2008):

$$(9) \quad h = 4,1868 * (0,24 * T + (597,3 + 0,441 * T) * RM)$$

em que:

h: Entalpia específica do ar, kJ kg_{a.s.}⁻¹;

RM: Razão de mistura, kg_v kg_{a.s.}⁻¹;

T: Temperatura de bulbo seco, °C.

A entalpia é um parâmetro muito importante para o dimensionamento de aquecedores, sistemas de secagem e composição do custo operacional dos diferentes sistemas (LOPES et al., 2000).

2.1.8 Temperatura de Bulbo Úmido

A temperatura de bulbo úmido é obtida cobrindo-se o bulbo de um termômetro comum (com características semelhantes à do termômetro de bulbo seco) com um tecido de algodão embebido em água destilada e resfriando-o com ar na velocidade mínima de 5 m s⁻¹ (LOPES et al., 2000).

Lopes e colaboradores (2000) afirmam que a temperatura medida pelo termômetro de bulbo úmido será a temperatura psicrométrica do bulbo úmido. A temperatura alcançada quando o ar úmido sofre um processo de resfriamento adiabático, devido à evaporação da água no ar, e atinge a temperatura da água, mantendo-se à pressão constante, é temperatura de bulbo úmido termodinâmica ou temperatura de equilíbrio. Na prática, as temperaturas de bulbo úmido termodinâmica e psicrométrica são consideradas iguais.

Quando não for conhecida, a temperatura de bulbo úmido pode ser obtida através da equação 10 (SOARES, 2007):

$$T_{bu} = T_{bs} - 1510 * \frac{P_{vs} - P_v}{P_{atm}} \quad (10)$$

em que:

- T_{bu} : Temperatura de bulbo úmido, °C;
- T_{bs} : Temperatura de bulbo seco, °C;
- P_{vs} : Pressão de vapor de saturação obtida da T_{bu} , Pa;
- P_v : Pressão de vapor, Pa;
- P_{atm} : Pressão atmosférica, Pa.

Como a T_{bu} e a P_{vs} são propriedades dependentes, torna-se difícil seu cálculo.

Para contornar o problema, a temperatura de bulbo úmido pode ser obtida de maneira iterativa a partir da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa ou da temperatura de bulbo seco e da temperatura de ponto de orvalho (NAVARRO; NOYES, 2000). Neste trabalho propõe-se outra alternativa: a temperatura do bulbo úmido é obtida a partir do conceito de dependência entre ela e a entalpia. A partir disso, rearranja-se a equação 9 para avaliar a temperatura. Pequenos acréscimos de umidade absoluta são feitos e a temperatura é avaliada, sempre com entalpia constante. Esses novos valores de umidade absoluta e de temperatura são usados para avaliar a umidade relativa do ar. Quando ela atingir 100 %, a temperatura que permitiu isso é a temperatura do bulbo úmido.

2.1.9 Volume Específico

O volume específico do ar é definido como o volume de ar por unidade de massa de ar seco. Esta propriedade pode ser calculada utilizando-se a equação 11 (ASABE, 2008):

$$p = 101,13 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,2568} \quad (11)$$

em que:

- V_e : Volume específico do ar, $m^3 \text{ kg}_{a.s.}^{-1}$;
- T : Temperatura de bulbo seco, K;
- P_{atm} : Pressão atmosférica, Pa;
- P_v : Pressão de vapor, Pa.

Segundo Lopes e colaboradores (2000), a potência requerida pelo ventilador em um sistema de secagem é afetada pelo volume específico do ar.

2.1.10 Variação da Pressão Atmosférica com a Altitude

Segundo Tubelis e Nascimento (1980), a pressão atmosférica diminui com a altitude, em decorrência da diminuição da densidade do ar, da aceleração da gravidade e da temperatura do ar. Determina-se a pressão atmosférica em função da altitude através da equação 12:

$$p = 101,13 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,2568} \quad (12)$$

em que:

p: Pressão atmosférica, kPa;

z: Altitude, m.

2.2 TABELAS E GRÁFICOS PSICROMÉTRICOS

As tabelas e gráficos psicrométricos são elaborados a partir das equações psicrométricas, de maneira a permitir a determinação mais rápida e de maneira prática das propriedades termodinâmicas do ar (ZOLNIER, 1994).

Os resultados obtidos por essas tabelas não são tão precisos quanto os determinados pelo método analítico. Mas, elas são bastante utilizadas por engenheiros e técnicos por causa de sua praticidade.

Zolnier (1994) afirma que a desvantagem é a necessidade de elaboração de várias tabelas e gráficos para diferentes valores de pressão atmosférica e a necessidade de correção dos valores obtidos quando são utilizados gráficos e tabelas com pressão atmosférica diferente da local.

O gráfico psicrométrico permite a determinação de outras propriedades psicrométricas além da umidade relativa. A Figura 1 mostra um gráfico psicrométrico para pressão atmosférica ao nível do mar (101,325 kPa). O eixo das abscissas corresponde à temperatura de bulbo seco, o eixo das ordenadas do lado direito da figura corresponde à razão de umidade ou umidade absoluta e o eixo das ordenadas do lado esquerdo corresponde à pressão de vapor. A umidade relativa é representada por linhas curvas localizadas entre os eixos do gráfico, começando pelo valor de 10% e finalizando com o valor de 100%. A linha correspondente

a 100% de umidade relativa é chamada linha de saturação ou linha do vapor saturante. Sobre esta linha são lidos os valores de temperatura de bulbo úmido e temperatura de ponto de orvalho. Os valores de entalpia são lidos nas linhas inclinadas paralelas, que extrapolam o gráfico, e o volume específico, nas linhas inclinadas internas a ele.

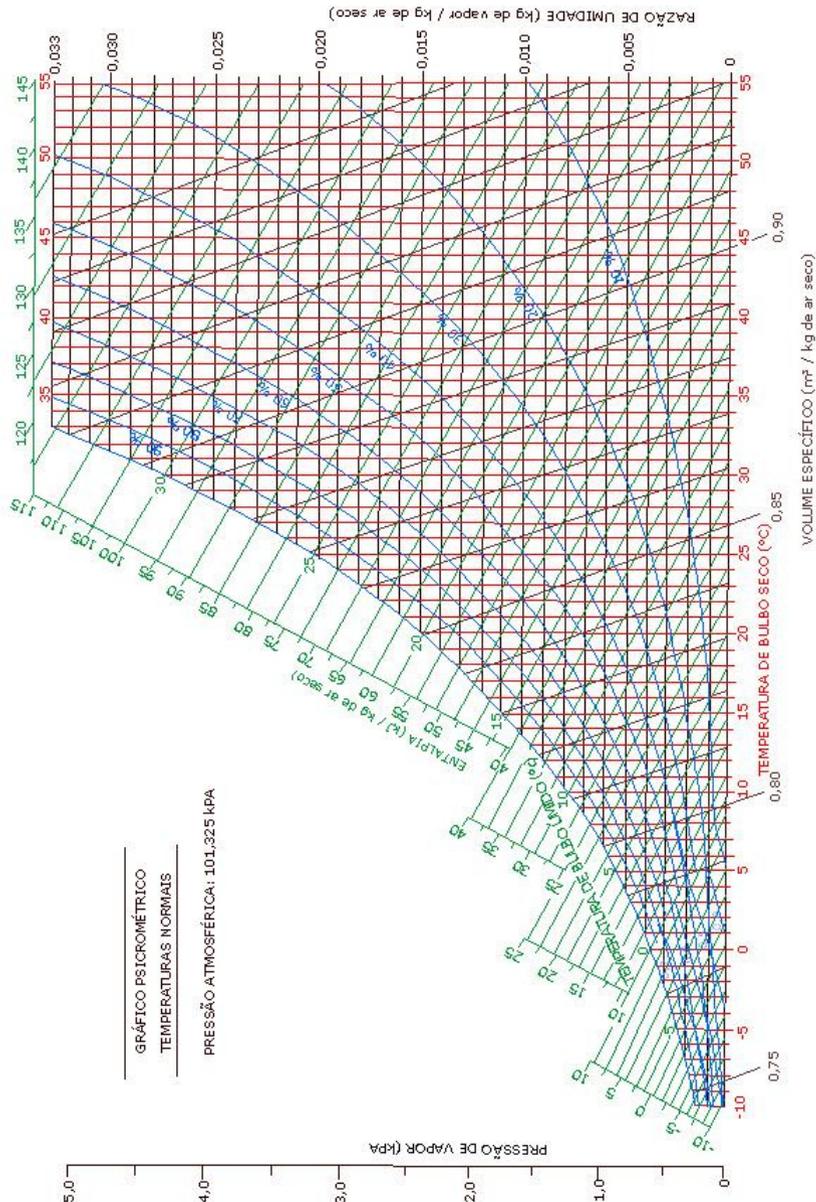


Figura 1 Gráfico psicrométrico à pressão atmosférica ao nível do mar

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

O programa computacional *Psicro 2009* foi desenvolvido utilizando o *software Visual Basic 6.0*. No desenvolvimento foram utilizadas diversas rotinas descritas por Perry (1999) e Wang (1999).

O programa contém os seguintes botões:

- **Salvar:** exibe a janela de salvar onde se têm a opção de salvar os cálculos determinados pelo *Psicro 2009*, podendo o usuário escolher entre as extensões .txt, .doc ou outro (*.*);
- **Imprimir:** exibe a janela de impressão onde se têm a opção de imprimir os cálculos determinados pelo *Psicro 2009*;
- **Novo:** limpa o conteúdo das caixas de texto do *Psicro 2009*;
- **Créditos:** exibe a janela que fornece a versão do programa, nome dos autores e e-mail para suporte;
- **Ajuda:** exibe a janela que contém a metodologia aplicada no *Psicro 2009* e as referências das equações que foram utilizadas;
- **Sair:** encerra o programa.

O programa faz os cálculos das propriedades psicrométricas do ar a partir do conhecimento de duas variáveis. O usuário pode escolher entre duas opções, para iniciar a determinação das propriedades psicrométricas do ar:

- Fornecer a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa. O programa calculará:
 - Pressão de vapor de saturação, através da equação 2.
 - Pressão de vapor, através da equação 4.
 - Temperatura do ponto de orvalho, através da equação 1.
 - Umidade absoluta ou razão de mistura, através da equação 6.
 - Razão de mistura de saturação, através da equação 7.
 - Entalpia, através da equação 9.
 - Volume específico, através da equação 11.
 - Grau de saturação, através da equação 8.
 - Temperatura de bulbo úmido, por iteração.

- Fornecer a temperatura de bulbo seco e a umidade absoluta ou razão de mistura. O programa calculará:
 - Pressão de vapor de saturação, através da equação 2.
 - Pressão de vapor, através da equação 3.
 - Razão de mistura de saturação, através da equação 7
 - Umidade relativa, através da equação 5.
 - Temperatura do ponto de orvalho, através da equação 1.
 - Grau de saturação, através da equação 8.
 - Entalpia, através da equação 9.
 - Volume específico, através da equação 11.
 - Temperatura de bulbo úmido, por iteração.

A temperatura de bulbo úmido foi determinada por iteração. Como em pós-colheita aceita-se que a T_{bu} e a h (entalpia) são propriedades dependentes. Usa-se a seguinte rotina computacional para determinar a temperatura do bulbo úmido:

- *Determinar a entalpia.*
- *Incrementar a umidade absoluta em um delta pré-estabelecido (0,000001).*
- *Avaliar a nova temperatura, com entalpia constante.*
- *Avaliar a umidade relativa do ar.*
- *Enquanto UR < 100 %,*
- *Repetir.*
- *Incrementar RM com delta.*
- *Calcular T_{bs} .*
- *Calcular UR.*
- *Se UR = 100 %,*
- *$T_{bs} = T_{bu}$.*

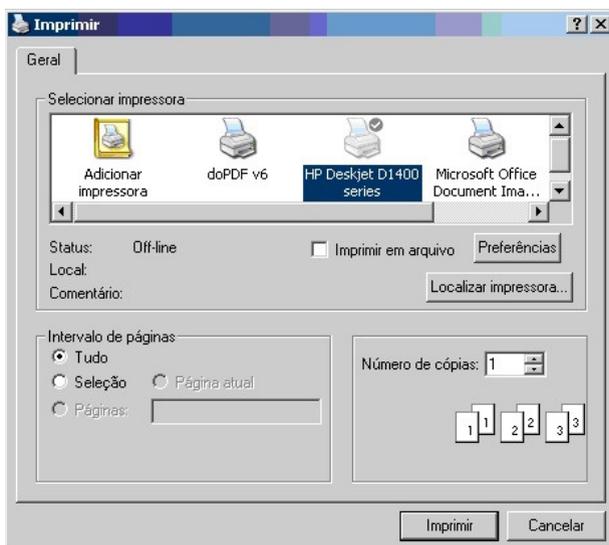
O programa *Psico 2009* apresenta como resultados as janelas mostradas nas figuras de 2 à 7.



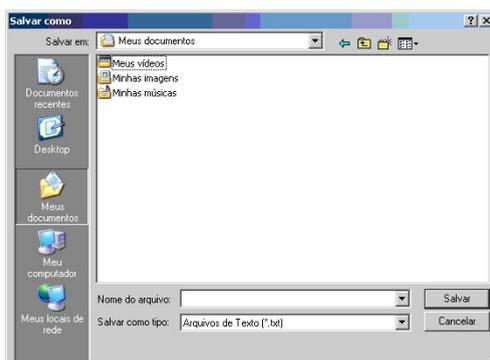
Figura 2 Janela de apresentação do programa



Figura 3 Janela principal do programa com exemplo de determinação das propriedades psicrométricas



4a



4b

Figura 4 Janela *Salvar*, que grava as propriedades psicométricas (4a) e *Imprimir*, que imprime as propriedades psicométricas (4b)



Figura 5 Janela *Créditos*, que contém informações do programa e como obter contato



Figura 6 Janela *Referências*, contendo as referências das fórmulas

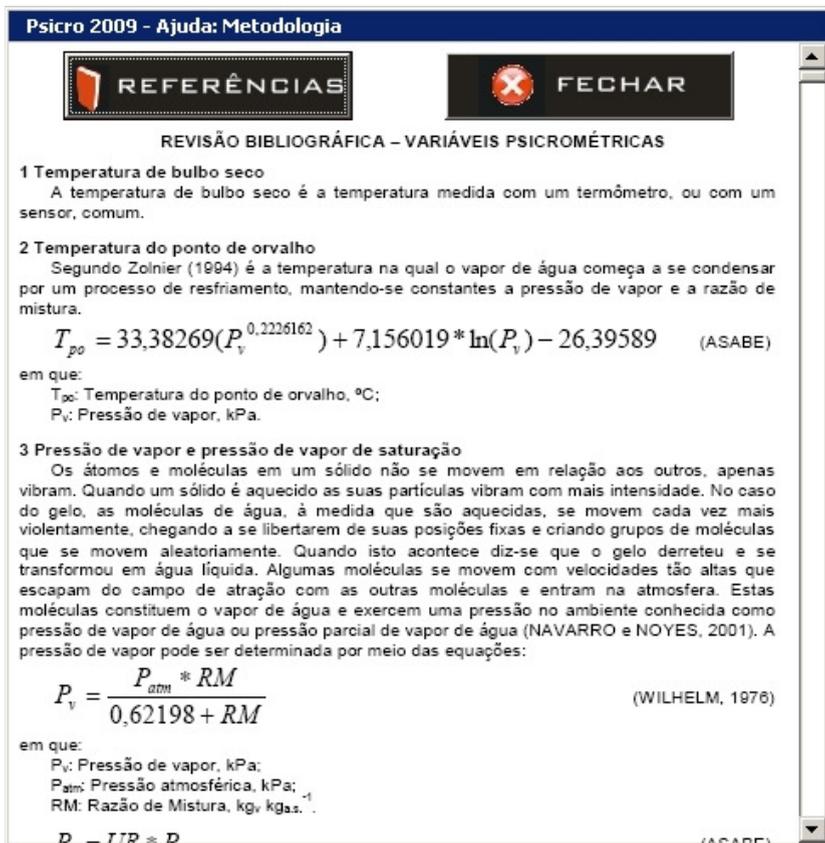


Figura 7 Janela *Ajuda*, que contém informações da metodologia do programa

O programa foi testado e vários pontos de estado foram determinados, sendo comparados com valores do gráfico psicrométrico.

Baseado nessas comparações, observa-se que os resultados são bastante satisfatórios.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa *Psicro 2009* é capaz de determinar, de maneira satisfatória e de fácil uso, as propriedades psicrométricas do ar.

O programa é recomendado como ferramenta de apoio para produtores rurais e técnicos que trabalhem com armazenamento de produtos agrícolas.

O programa apresenta precisão e agilidade nos resultados, dispensando o uso de gráficos e tabelas psicrométricas.

REFERÊNCIAS

ASABE. American Society of Agricultural Engineers, American Society of Agricultural and Biological Engineering. Disponível em: <<http://www.asabe.org>>. Acesso em: 20 jun. 2008.

NAVARRO, S.; NOYES, R. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Florida: Crc Press, 2001.

LOPES, R. P. et al. Princípios básicos de psicrometria. In: SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG: Editora Aprenda Fácil, 2000. p. 39-62.

PERRY, G. **Aprenda em 24 horas visual basic**. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 1999.

SOARES, M. **Termodinâmica IV-20**. 2007. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/termo/termod0420.shtml>>. Acesso em: 14 mar. 2008.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo, SP: Nobel, 1980.

WANG, W. **Visual basic 6**. Rio de Janeiro, RJ: Campus, 1999.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS: Salles, 2005.

WILHELM, L. R. Numerical calculation of psychometric properties. **Transactions of ASAE**, v. 19, n. 2, p. 318-325, 1976.

ZOLNIER, S. **Psicrometria I**: caderno didático 13. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 1994.

Recebido em: 26 Fevereiro 2010

Aceito em: 15 Abril 2010