

ESTIMATIVAS DO POTENCIAL TOTAL DE ÁGUA EM SEMENTES USANDO MODELOS NÃO LINEARES¹

PEDRO ABEL VIEIRA-JUNIOR², WALTER RODRIGUES DA SILVA³, NILSON AUGUSTO VILLA NOVA⁴,
CARLOS TADEU DOS SANTOS DIAS⁵, OSCAR SMIDERLE⁶, DURVAL DOURADO-NETO³ e SILVIO MOURE CICERO³

RESUMO - As sementes realizam trocas gasosas, interferentes em seus processos fisiológicos, que caracterizam os processos de hidratação e de secagem até que o equilíbrio higroscópico com o meio seja estabelecido. O entendimento do sentido e do tempo dessas trocas tem sido dificultado pela ausência de instrumentação tecnológica destinada à estimativa do potencial hídrico das sementes; por este motivo, as relações hídricas das sementes com a atmosfera têm sido previstas a partir de dados, experimentalmente obtidos, do teor de água das sementes submetidas a atmosferas conhecidas. Assim, a alternativa de estimar o potencial total de água das sementes permitiria a simplificação necessária ao entendimento dos processos físicos envolvidos nas suas trocas de água com a atmosfera. A partir de dados do potencial total de água na atmosfera e o teor de água de equilíbrio das sementes com atmosferas conhecidas, desenvolveram-se modelos que permitem estimar o potencial total de água em sementes de milho, arroz, soja e feijão.

Termos para indexação: sementes, potencial hídrico, modelos.

NON LINEAR MODELS TO ESTIMATE THE TOTAL WATER POTENCIAL IN SEEDS

ABSTRACT - The seeds accomplish gaseous changes, which interfere in its physiologic processes, that characterize the hydration and drying process until the hygroscopic balance with the environment had been established. The understanding of the sense and of the time of those changes had been hindered by the absence of appropriate technique to estimate the hydric potential of the seeds; for this reason, the relationships between the water content of the seeds with the atmosphere had been foreseen starting from data, obtained experimentally, of water content of the seeds submitted to well-known atmospheres. Thus, the alternative of esteeming the total water potential of the seeds would allow the necessary simplification to the understanding of the physical processes involved in its changes of water with the environment. Starting from data of the total water potential in the atmosphere and the water content of the seeds with well-known atmospheres, models were developed that allow to esteem the total water potential in seeds of corn, rice, soybean and common bean.

Index terms: seeds, water potential, modeling.

INTRODUÇÃO

As trocas energéticas em sistemas abertos ocorrem no sentido do maior para o menor potencial até que o equilíbrio seja atingido, sendo o ponto de equilíbrio função da temperatu-

ra, do teor de água e da composição química dos sistemas envolvidos. Assim, as trocas de água são controladas pelas diferenças existentes entre os potenciais hídricos (ψ) dos sistemas (Libardi, 1995).

A estimativa, do potencial total de água na atmosfera tem sido obtida por intermédio de cálculo, envolvendo a temperatura e a umidade relativa, através da equação apresentada por Taylor, citado por Villa-Nova et al. (1996).

$$\psi = \frac{RT}{V} \times \ln \frac{UR}{100} \quad (1)$$

em que R é a constante universal dos gases ($0,082 \text{ atm.l.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), V é o volume molar da água ($0,0181 \text{ l.mol}^{-1}$), T é a temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$) e UR é a umidade relativa ($\text{MPa} \cdot \text{MPa}^{-1}$).

¹ Aceito para publicação em 26.05.99.

² Pesquisador, Embrapa-SPSB, Gerência Local de Sete Lagoas, Cx. Postal 151, 35701-970, Sete Lagoas-MG.

³ Prof. Dr., Depto. de Agricultura, ESALQ/USP, Cx. Postal 9, 13418-900, Piracicaba-SP.

⁴ Prof. Adjunto, Depto. de Física e Meteorologia, ESALQ/USP.

⁵ Prof. Doutor, Depto. de Matemática, ESALQ/USP.

⁶ Pós-graduando em fitotecnia, Depto. de Agricultura, ESALQ/USP.

Com relação aos fatores intrínsecos relacionados ao potencial de água das sementes e, conseqüentemente, aos seus pontos de equilíbrio higroscópico, o conteúdo de proteínas é de maior importância (Woodstock, 1988); as contribuições da celulose, das substâncias pécicas e do amido são de reduzido significado (Ngoddy & Bakker-Arkema, 1976). Quando mantidas em um mesmo ambiente, as sementes classificadas como proteicas atingem o equilíbrio higroscópico com menores teores de água do que as amiláceas em virtude das proteínas apresentarem potencial matricial mais negativo do que os carboidratos. Assim, entre as cultivares de uma mesma espécie, não são observadas variações significativas, desde que as sementes apresentem composições químicas semelhantes. Além das diferenças devidas à espécie, a histerese, atribuída por Ngoddy & Bakker-Arkema (1976) às prováveis alterações nas dimensões dos poros das sementes, promove variações nos valores do teor de água de equilíbrio segundo a via (hidratação ou desidratação) utilizada.

O entendimento, do sentido e do tempo dessas trocas, tem sido dificultado pela ausência de instrumentação tecnológica destinada à determinação do potencial hídrico das sementes; por este motivo, as relações hídricas das sementes com a atmosfera têm sido previstas a partir de dados, experimentalmente obtidos, do teor de água das sementes mantidas em ambientes com atmosferas conhecidas que, por sua vez, têm permitido o desenvolvimento de modelos destinados a estimar os teores de água das sementes em equilíbrio higroscópico sob diferentes situações de temperatura e de umidade relativa. A validade dos modelos é dificultada na composição química entre as sementes de espécies diferentes.

Para quantificar a relação existente entre temperatura, umidade relativa do ar e a umidade de equilíbrio de um produto, Roa & Rossi (1974), citado por Rossi & Roa (1980), propuseram o seguinte modelo:

$$US = \left[\sum_{i=1}^3 p_i UR^i \right] \left(\sum_{j=0}^4 q_j UR^j \right) (\gamma T + \beta)$$

em que US é o teor de água ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$) das sementes, p_i ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), q_i e β são coeficientes empíricos determinados por espécie através de análise de regressão, γ é o coeficiente unitário de consistência dimensional (1°C^{-1}), T é a temperatura ($^\circ\text{C}$) e UR é a umidade relativa ($\text{MPa} \cdot \text{MPa}^{-1}$).

Avaliando alguns modelos propostos para sementes de milho, Benedetti (1986) considerou adequado o modelo sugerido por Hendersen (1952) que, segundo Rossi & Roa (1980), foi quantitativamente inferior ao do proposto por Roa & Rossi (1974).

Apesar das dificuldades existentes durante as avaliações de trocas de água entre sementes e atmosfera, a alternativa de esti-

mar o potencial total de água das sementes, de valor idêntico ao existente na atmosfera em situação de equilíbrio (Villa Nova et al., 1996), permitiria a simplificação necessária ao entendimento dos processos físicos envolvidos nas trocas de água. O objetivo do presente trabalho é o de verificar essa possibilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizando a equação (1), foi calculado o potencial total de água na atmosfera considerando variações de umidade relativa entre 30 e 90% em intervalos de 10%, e de temperatura entre 16 e 32°C em intervalos de 2°C . A partir desses dados, foram obtidas, com emprego da rotina "proc plot" do sistema estatístico SAS (SAS, 1990), as isotermas para o potencial de água na atmosfera (Figura 1).

Adotando-se o modelo proposto por Roa et al. (1974), citado por Rossi & Roa (1980), e admitindo as mesmas variações e intervalos para a umidade relativa e para a temperatura, foram empregados dados de teor de água (US, %) no ponto de equilíbrio higroscópico das sementes de soja, milho, feijão e arroz, determinados por ASAE (1980) e apresentados nas Tabelas 1 a 4, para a construção de isotermas por espécie empregando-se a rotina "proc plot" do sistema estatístico SAS (SAS, 1990).

A seguir, considerando equivalentes os potenciais hídricos da atmosfera e das sementes no ponto de equilíbrio higroscópico (Libardi, 1995), e utilizando o conjunto de dados obtidos para o potencial total de água na atmosfera e os dados citados por ASAE (1980) para o ponto de equilíbrio higroscópico das sementes com a atmosfera, foram determinadas, com emprego da rotina "proc reg" do sistema estatístico SAS (SAS, 1990), equações matemáticas que representassem as relações entre teor de água e o potencial hídrico das sementes nas espécies estudadas. Estudando o melhor ajuste das equações, foram simultaneamente transformados por $\log_{10}$ e raiz quadrada os valores dos teores de água das sementes.

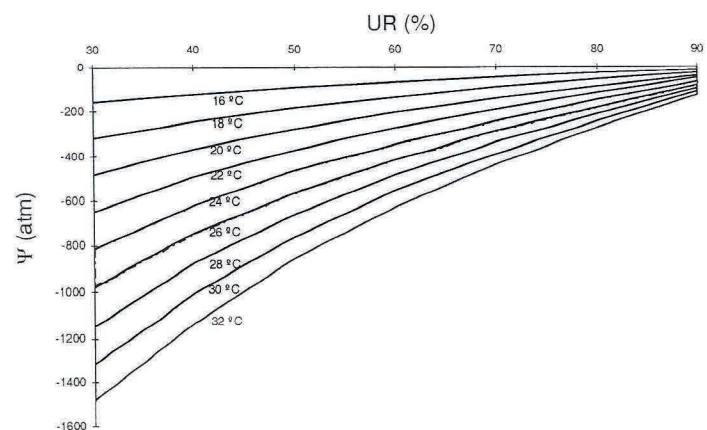


FIG. 1. Isotermas relacionando o potencial hídrico (ψ , atm), temperatura ($^\circ\text{C}$) e a umidade relativa (UR, %) da atmosfera.

TABELA 1. Teores de água (US, %) das sementes de milho em equilíbrio com a atmosfera em função da umidade relativa (UR, %) e da temperatura (Temp., °C) (ASAE, 1980).

Temp. (°C)	UR (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
16	9,2	10,5	11,8	13,2	14,8	16,7	19,7
18	9,0	10,3	11,6	13,0	14,6	16,6	19,5
20	8,8	10,1	11,5	12,8	14,4	16,4	19,4
22	8,6	10,0	11,3	12,7	14,3	16,2	19,2
24	8,5	9,8	11,1	12,5	14,1	16,1	19,1
26	8,3	9,6	10,9	12,3	13,9	15,9	19,0
28	8,1	9,4	10,8	12,2	13,8	15,8	18,8
30	7,9	9,3	10,6	12,0	13,6	15,6	18,7
32	7,8	9,1	10,5	11,9	13,5	15,5	18,6

TABELA 2. Teores de água (US, %) das sementes de arroz em equilíbrio com a atmosfera em função da umidade relativa (UR, %) e da temperatura (Temp., °C) (ASAE, 1980).

Temp. (°C)	UR (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
16	9,4	10,4	11,4	12,5	13,8	15,4	17,8
18	9,3	10,3	11,3	12,4	13,7	15,2	17,6
20	9,1	10,2	11,2	12,3	13,5	15,1	17,5
22	9,0	10,0	11,0	12,1	13,4	15,0	17,4
24	8,9	9,9	10,9	12,0	13,3	14,9	17,3
26	8,7	9,8	10,8	11,9	13,2	14,8	17,2
28	8,6	9,6	10,7	11,8	13,1	14,7	17,1
30	8,5	9,5	10,6	11,7	13,0	14,6	17,0
32	8,4	9,4	10,5	11,6	12,8	14,5	16,9

TABELA 3. Teores de água (US, %) das sementes de soja em equilíbrio com a atmosfera em função da umidade relativa (UR, %) e da temperatura (Temp., °C) (ASAE, 1980).

Temp. (°C)	UR (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
16	5,8	7,5	9,2	10,9	12,9	15,4	19,1
18	5,7	7,4	9,1	10,8	12,8	15,3	19,0
20	5,6	7,3	9,0	10,7	12,8	15,2	19,0
22	5,4	7,2	8,9	10,7	12,7	15,2	18,9
24	5,3	7,1	8,8	10,6	12,6	15,1	18,8
26	5,2	7,0	8,7	10,5	12,5	15,0	18,7
28	5,1	6,9	8,6	10,4	12,4	14,9	18,6
30	5,0	6,8	8,5	10,3	12,3	14,8	18,6
32	4,9	6,7	8,4	10,2	12,2	14,8	18,5

TABELA 4. Teores de água (US, %) das sementes de feijão em equilíbrio com a atmosfera em função da umidade relativa (UR, %) e da temperatura (Temp., °C) (ASAE, 1980).

Temp. (°C)	UR (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
16	8,6	10,0	11,4	12,9	14,6	16,7	19,8
18	8,6	10,0	11,4	12,9	14,5	16,6	19,8
20	8,5	9,9	11,3	12,8	14,5	16,4	19,7
22	8,5	9,9	11,3	12,7	14,4	16,5	19,7
24	8,4	9,8	11,2	12,7	14,4	16,5	19,6
26	8,3	9,8	11,2	12,6	14,3	16,4	19,6
28	8,3	9,7	11,1	12,6	14,3	16,4	19,5
30	8,2	9,7	11,1	12,5	14,2	16,3	19,5
32	8,2	9,6	11,0	12,5	14,2	16,3	19,5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Corroborando com as afirmações de Larcher (1995), a Figura 1, representando as isotermas estimadas para as relações entre umidade relativa e o potencial hídrico da atmosfera, indica que as reduções no potencial total, promovidas pelo aumento da temperatura, foram sendo ampliadas com as diminuições da umidade relativa.

As isotermas plotadas em gráfico entre o teor de água das sementes e a umidade relativa da atmosfera (Figuras 2 a 5), considerando os pontos de equilíbrio higroscópico das sementes com a atmosfera determinados por ASAE (1980), indicaram comportamentos distintos entre as espécies, pois, semen-

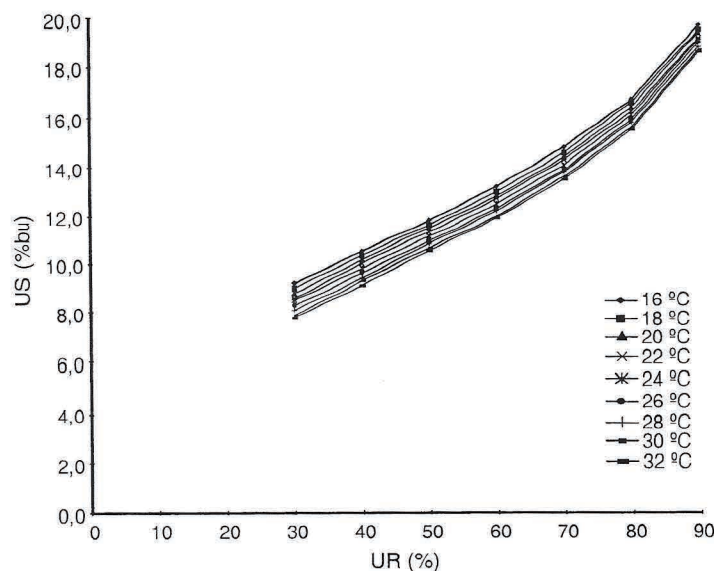


FIG. 2. Isotermas relacionando temperatura (°C), umidade relativa (UR, %) e o teor de água (US, %) das sementes de milho em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

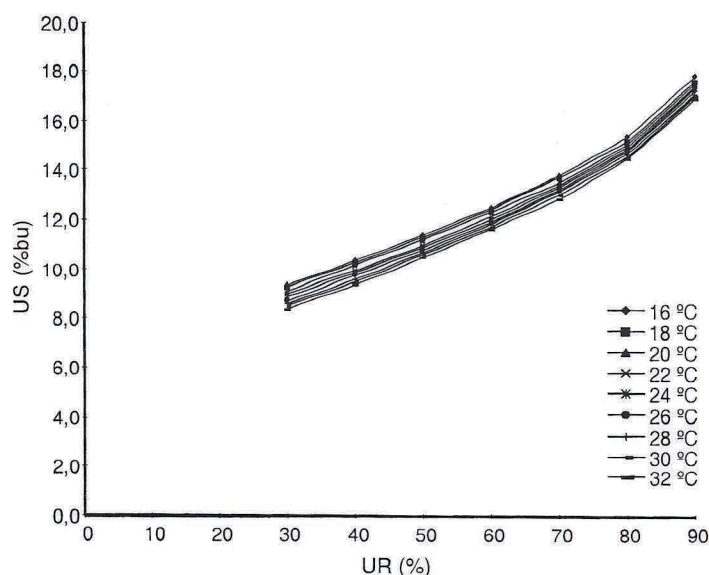


FIG. 3. Isotermas relacionando temperatura (°C), umidade relativa (UR, %) e o teor de água (US, %) das sementes de arroz em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

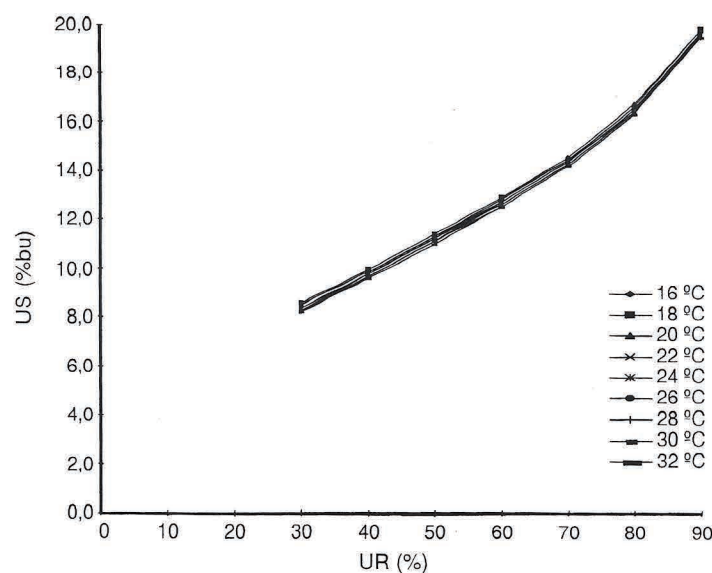


FIG. 5. Isotermas relacionando temperatura (°C), umidade relativa (UR, %) e o teor de água (US, %) das sementes de feijão em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

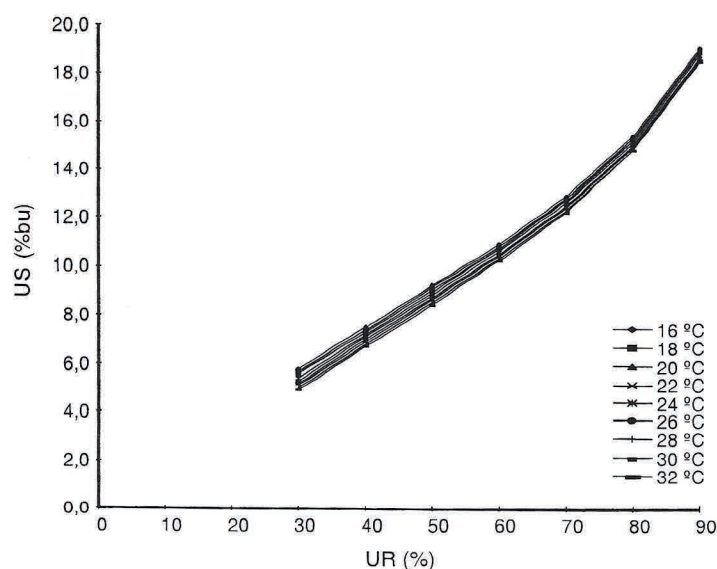


FIG. 4. Isotermas relacionando temperatura (°C), umidade relativa (UR, %) e o teor de água (US, %) das sementes de soja em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

tes de milho e arroz, ambas espécies amiláceas, atingem o equilíbrio com ambiente de UR igual a 40%, com teores de água na semente variando entre 7% e 9%, considerando todas as temperaturas indicadas. Já sementes de soja e feijão, ambas espécies proteicas, nas mesmas condições, atingem o equilíbrio com teores de água na semente variando entre 4 e 8%.

Quando fixada a umidade relativa, além das esperadas diferenças no teor de água entre as espécies, foram identificadas interferências da temperatura com a intensidade distinta para cada espécie. Sob este aspecto, a amplitude do efeito da tem-

peratura no teor de água das sementes decresceu sequencial e progressivamente do milho para o arroz, a soja e o feijão; este comportamento, apesar de admissível como decorrência de variações existentes entre as composições e estruturas dos materiais considerados (Leopold, 1986), não acha-se devidamente elucidado pelas pesquisas conduzidas com sementes. De um modo generalizado, a elevação na temperatura e a redução na umidade relativa promoveram a diminuição do teor de água nas sementes de todas as espécies.

As Figuras 6 a 9 apresentam os resultados encontrados para as relações entre o teor de água e o potencial hídrico das sementes.

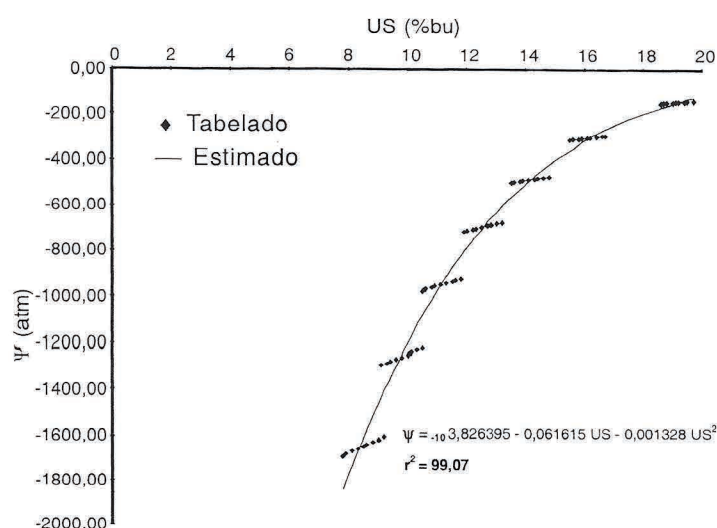


FIG. 6. Relações entre o teor (US, %) e o potencial total de água (Ψ , atm) nas sementes de milho em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

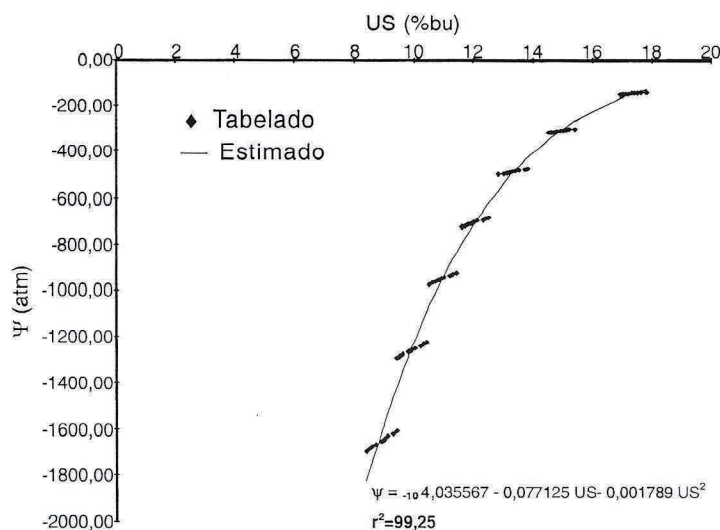


FIG. 7. Relações entre o teor (US, %) e o potencial total de água (y, atm) nas sementes de arroz em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

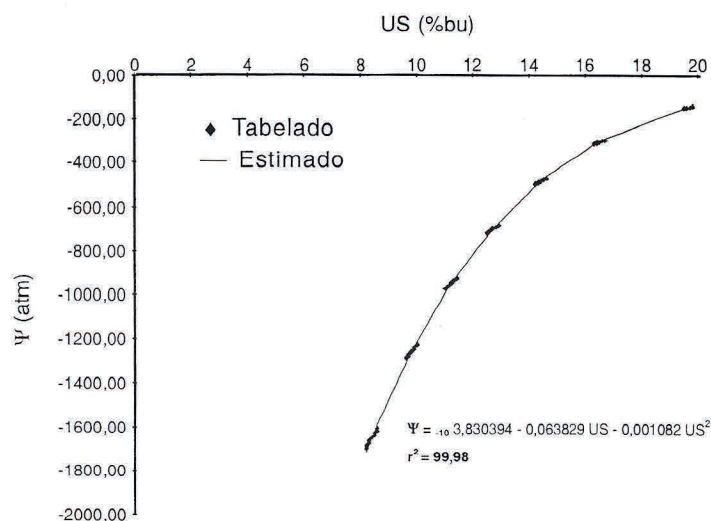


FIG. 9. Relações entre o teor (US, %) e o potencial total de água (y, atm) nas sementes de feijão em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

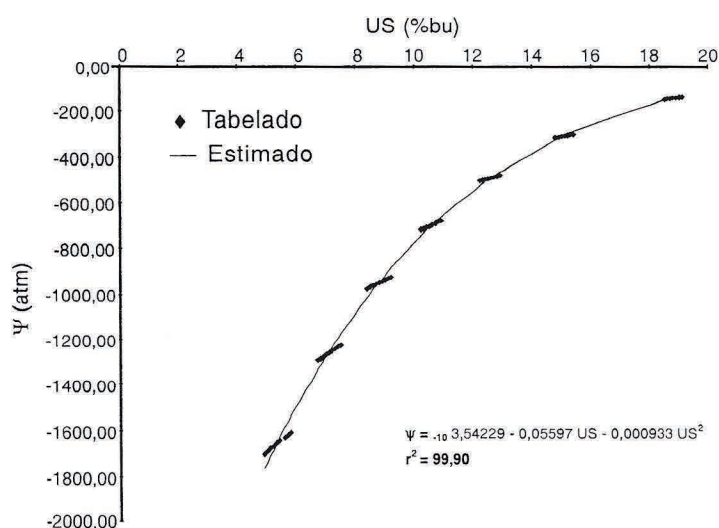


FIG. 8. Relações entre o teor (US, %) e o potencial total de água (y, atm) nas sementes de soja em equilíbrio higroscópico com a atmosfera.

Após aplicação de $\log_{10}$ para a escala de teor de água, o modelo quadrático mostrou-se como o mais ajustado em todos os casos. Graficamente, foram observados desvios crescentes, entre os dados previstos por cálculos e os fornecidos pelas curvas, a medida que o potencial hídrico foi sendo reduzido; a magnitude dos desvios teve diminuição sequencial e progressiva do milho para o arroz, a soja e o feijão, obedecendo as mesmas ordenações constatadas para a diminuição na amplitude do efeito da temperatura sobre o teor de água das sementes (Figuras 2 a 5) e para aumento nos valores dos coeficientes de correlação encontrados (Figuras 6 a 9). Os modelos obtidos para estimativa do potencial total de água (Ψ em atm),

em função do teor de água (US em % bu) em sementes de:

milho ($\Psi = -10^3 3,826395 - 0,061615 \text{ US} - 0,001328 \text{ US}^2$),
 arroz ($\Psi = -10^4 4,035567 - 0,077125 \text{ US} - 0,001789 \text{ US}^2$),
 soja ($\Psi = -10^3 3,542290 - 0,055970 \text{ US} - 0,000933 \text{ US}^2$) e
 feijão ($\Psi = -10^3 3,830394 - 0,063829 \text{ US} - 0,001082 \text{ US}^2$)

invariavelmente com coeficientes de correlação (r^2) superiores a 99%, mostraram-se eficientes nas explicações dos fenômenos estudados. Dessa maneira, foram constatadas possibilidades de estimar, a partir do teor de água, o potencial hídrico das sementes.

Os estudos realizados sobre as trocas hídricas entre as sementes e a atmosfera, promotoras da hidratação ou secagem, têm se apoiado em dados atmosféricos tratados em conjunto. Contudo, os potenciais hídricos dos dois sistemas, apesar de coordenarem os processos de troca, não têm sido considerados pelas dificuldades encontradas na estimativa do existente nas sementes. Com isso, a dinâmica do fenômeno tem sido estimada em bases incompletas e, portanto, com imperfeições que dificultam o entendimento demandado pelas previsões de comportamento, principalmente no que diz respeito à variabilidade temporal.

A estimativa do potencial hídrico das sementes sob uma condição atmosférica, portanto, pode se constituir em instrumento capaz de aprimorar a busca de esclarecimentos relacionados às previsões de valores, sentidos e tempos envolvidos nas transferências de água entre as sementes e a atmosfera.

CONCLUSÃO

O potencial total de água nas sementes pode ser estimado, através de equações específicas para cada espécie vegetal, a partir dos dados do teor de água.

REFERÊNCIAS

- ASAE. Moisture relationship of grains. **Agricultural engineers year book**. St. Joseph: Am. Soc. of Agric. Eng., 1980. p.343.
- BENEDETTI, B.C. & JORGE, J.T. Curvas de teores de água (%H₂O_{bu}) de milho variedade Maya XX. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 16, Belo Horizonte, 4/8 ago. 1986. **Anais**. Belo Horizonte: ABMS/EPAMIG, 1986. p.153-159.
- HENDERSEN, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, Uniontown, v.33, n.1, p.29-33, 1952.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, 1995. 497p.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. 3.ed. Berlim: Springer Verlag, 1995. 506p.
- LEOPOLD, A.C. Physical attributes of desiccated seeds. In: LEOPOLD, A.C. (ed.) **Membranes, metabolism and dry organisms**. Ithaca: Cornell University Press, 1986. p.22-34.
- NGODDY, P.O. & BAKKER-ARKEMA, F.W.A. generalized theory of sorption phenomena in biological materials: the isotherm equation. **Transactions of the ASAE**, Madison, v.13, pt.1, p.612-617, 1976.
- ROA, G. & ROSSI, S.J. Determinação experimental de curvas de teores de água (%H₂O_{bu}) mediante a mediação da umidade relativa de equilíbrio. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.2, n.2, p.17-22, 1974.
- ROSSI, S.J. & ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: ACIESP/USP, 1980. v.22, 295p.
- SAS. **User's Guide, version 6**. 4.ed. Cary: SAS Institute Inc., 1990. 1848p.
- VILLA-NOVA, N.A.; BACCHI, O.O.S. & REICHARDT, K. Potencial da água no sistema solo - planta estimado através da fase de vapor. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, n.1, p.194-198, 1996.
- WOODSTOCK, L.W. Seed imbibition: a critical period for successful germination. **Journal of Seed Technology**, Lansing, v.12, n.1, p.1-15, 1988.