



Principios de secado de granos psicometria higroscopia

[Contenido](#) (72 p.)

OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMERICA LATINA Y EL CARIBE

Santiago, Chile
1991

Serie: Tecnología Poscosecha 8

José Antonio Marques Pereira
Daniel Marcal de Queiroz

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, juicio alguno sobre la condición jurídica de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

El conocimiento es un patrimonio de la humanidad y, como tal, debe ser amplia y rápidamente difundido para que beneficie a todas las personas para las cuales ha sido generado.

Por esta razón, la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe autoriza y estimula la reproducción total o parcial del contenido de esta publicación.

Se agradecerá mencionar la fuente del documento y enviar a ésta Oficina un ejemplar del material reproducido.

Derechos de autor

Por este medio se autoriza la reproducción digital o impresa parcial o total de este trabajo, para su utilización personal o en las aulas, sin costo y sin solicitud formal de reproducción, siempre que no se elaboren copias con fines de lucro ni comerciales, y que todas las copias lleven este aviso completo en la primera página. Los derechos de autor de los trabajos que no sean propiedad de la FAO deben respetarse. Para hacer reproducciones con otros fines, publicar, enviar a través de los servidores o redistribuir en las listas, se requiere autorización específica previa y el pago de una cuota cuando sea pertinente.

Los permisos de publicación se solicitan a:

Editor en Jefe

FAO, Viale delle Terme di Caracalla

00100 Roma, Italia

correo electrónico: copyright@fao.org

© FAO

Contenido (72 p.)

[Prologo](#)

1. Principios de secado de granos

Introducción

2. Psicrometría

Introducción

Aire atmosférico

Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo

Gráfico psicrométrico

Determinación de las propiedades en un punto de estado

Calentamiento y enfriamiento sensible del aire

Enfriamiento con deshumedecimiento

Secado y humedecimiento adiabático del aire

Humedad relativa y déficit de presión de vapor

Tabla psicrométrica

Ecuaciones psicrométricas

3. Higroscopía

Fenómeno de "sorcion"

Isotermas de sorcion

Modelos de equilibrio higroscópico

Ecuaciones de humedad de equilibrio para diversos productos

Métodos experimentales para obtener el equilibrio higroscópico

Entalpía de vaporización

4. Lista de símbolos

5. Referencias bibliográficas

6. Apéndice

7. Sistema internacional de unidades (SI)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

Prologo

[Indice](#) - [Siguiete](#)➤

El presente folleto forma parte de la serie: "Tecnología Postcosecha", publicación de la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, que trata diversos temas relacionados con las tecnologías y procedimientos utilizados en la cosecha, beneficio y almacenamiento de los granos, raíces, tubérculos, frutas y hortalizas que se emplean en la alimentación humana, así como de las plagas que los atacan, los métodos para su control y los factores de calidad que intervienen en su manejo y comercialización.

Su contenido está escrito en un lenguaje sencillo, pero apoyado en los conocimientos y experiencias de técnicos e instituciones que han encaminado sus esfuerzos para especializarse en alguna de las muchas disciplinas científicas y técnicas que intervienen en el manejo de estos productos, desde su madurez fisiológica en la planta, hasta que es utilizado como alimento.

Con su publicación se busca proporcionar información de utilidad para todas aquellas personas que tienen bajo su

responsabilidad el manejo de estos productos agrícolas, en algunas de sus múltiples etapas, especialmente agricultores y personal técnico encargado de centros de acoplo y almacenamiento; así como también a los extensionistas encargados de programas de capacitación en esta área. No dudamos que la información también será de utilidad para profesionales, personal de docencia y estudiantes que tengan interés en este campo.

La FAO espera que la información ayude a mejorar las técnicas y procedimientos actualmente utilizados en el manejo y almacenamiento de los productos agrícolas en Latinoamérica y con ello, contribuir a disminuir las cuantiosas pérdidas postcosecha de alimentos que son necesarios para una población cada día más numerosa y hambrienta.

1. Principios de secado de granos

Introducción

En el mundo se han desplegado muchos esfuerzos con el fin de aumentar la producción y la productividad de los productos agrícolas. Estos esfuerzos, que exigen inversiones importantes, se han visto parcialmente neutralizados por las pérdidas que se producen después de la maduración del grano.

No hay estudios concluyentes relativos a las pérdidas de granos posteriores a la cosecha, en América Latina. Se han hecho estimaciones, todas las cuales indican un mínimo de 20%. Tomando esa cifra como base, el perjuicio anual para el Brasil, por ejemplo, es superior a mil millones de dólares. Se piensa que en los demás países de América Latina las pérdidas de granos posteriores a la cosecha también son elevadas. Lo dicho refleja indirectamente las precarias condiciones en que se realiza el tratamiento de la mayor parte de los granos producidos. El tratamiento de granos se compone de una serie de operaciones unitarias, entre las que se destaca el secado. La falta de secado adecuado es una de las principales fuentes de pérdida de productos agrícolas.

El secado de granos se puede definir como el método universal de adecuar los granos mediante la eliminación del agua hasta un nivel que prevenga el crecimiento de hongos y bacterias, de manera que se conserve el aspecto y la calidad nutritiva del grano como alimento, o su viabilidad como semilla. El nivel seguro de humedad para el almacenamiento de granos se encuentra entre el 10 y el 13%, base húmeda, para las principales especies, dadas las condiciones medias de temperatura y humedad relativa en América Latina.

Las técnicas de secado y almacenamiento de granos son ampliamente conocidas y utilizadas en países desarrollados. Esto quiere decir que, luego de adaptarse a las condiciones de clima y realidad económica, es posible mejorar las técnicas y equipos que se emplean en América Latina. Por lo menos en principio, esta afirmación es válida; no obstante, el mejoramiento aludido puede verse limitado por algunos factores entre los cuales los más importantes son: a) el nivel de instrucción del usuario; b) el costo de la tecnología; c) el volumen de producción por productor rural; y d) la disponibilidad de energía eléctrica.

Un sistema de secado y almacenamiento exige costos de inversión relativamente elevados, dependiendo del poder adquisitivo del comprador. La adquisición o construcción de un sistema de secado involucra la necesidad de adiestramiento técnico del usuario, para que pueda aprovechar al máximo los beneficios que la tecnología instalada puede ofrecer, puesto que las ventajas del sistema dependen de su buen manejo. Además de conocer las características del equipo de secado, el usuario debe saber que su capacidad de negociación aumenta en la comercialización, al obtener un grano de mejor calidad. Debido a los costos iniciales aludidos, para que el uso de las técnicas de secado más modernas sea económicamente viable, debe haber un nivel de producción mínimo. Con todo, es un error suponer que esta tecnología es recomendable sólo para grandes volúmenes de producción. Las variaciones de la técnica extienden su utilización a un abanico amplio de producción de granos. Como es natural, a medida que se traten volúmenes mayores, mejor será el tratamiento que ellos podrán recibir, por los refinamientos que se podrán incorporar al sistema de secado.

En los equipos de secado, los intercambios de aire y masa entre el grano y el aire de secado se producen principalmente por convección forzada de aire. Por tal motivo, los secadores de granos están provistos generalmente, de un ventilador, como agente de movimiento del aire. La falta de energía eléctrica para impulsar estos ventiladores es una de las mayores trabas que impide, en los países en desarrollo, la popularización del sistema de secado y almacenamiento a

nivel de predio.

En los últimos diez años se han producido importantes cambios y perfeccionamientos en las técnicas y equipos que se usan para el secado de granos en los países desarrollados. Los adelantos en los estudios de las teorías de secado y la ayuda del computador en la técnica de simulación del proceso de secado, para optimizar el procedimiento y los equipos, contribuyeron a ese perfeccionamiento.

El propósito de este material es el de servir como fuente de consulta respecto de los principios del secado y de ciertas tecnologías y equipos (secadores) destinados a secar granos. Aquí se tratan dos temas básicos para comprender los principios del secado: la psicrometría y la higroscopia. Se espera que este material pueda contribuir a mejorar los conocimientos de técnicos e investigadores que trabajan en el sector de postcosecha de granos en América Latina.

2. Psicrometría

[Introducción](#)

[Aire atmosférico](#)

[Propiedades termodinámicas del aire húmedo](#)

[Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo](#)

[Gráfico psicrométrico](#)

[Ecuaciones psicrométricas](#)

Introducción

El estudio detallado de las propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua es de tal importancia que constituye una ciencia aparte, la psicrometría.

La psicrometría se define como "aquella rama de la física relacionada con la medición o determinación de las condiciones del aire atmosférico, particularmente respecto de la mezcla de aire seco y vapor de agua", o bien "aquella parte de la ciencia que está en cierta forma íntimamente ligada a las propiedades termodinámicas del aire húmedo". Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de postcosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

En la conservación y almacenamiento de productos agrícolas se emplean diversas prácticas con participación directa de la psicrometría; una de dichas prácticas es el secado. En el secado a bajas temperaturas en particular, la tasa de secado depende de la capacidad del aire para evaporar la humedad (potencial de secado), la cual es determinada por las condiciones psicrométricas del aire: temperatura y humedad relativa.

En el secado y almacenamiento, uno de los conceptos más importantes es el contenido de humedad de equilibrio. Así se denomina al intercambio recíproco de humedad entre materiales higroscópicos, tales como los granos, y el aire que los rodea; la condición de intercambio recíproco de humedad indica el equilibrio que hay entre el aire y el material. Se establece dicho equilibrio cuando la presión de vapor que corresponde a la humedad del producto es igual a la presión de vapor de la humedad presente en el aire, en condiciones fijas de temperatura. Por tanto, en los estudios de higroscopia, las propiedades termodinámicas del aire húmedo son de fundamental importancia.

El conocimiento de las condiciones de humedad y temperatura del aire es de gran importancia también en muchos otros aspectos de la actividad humana. La conservación de productos tales como frutas, hortalizas, huevos y carnes, en cámaras frigoríficas, depende en gran medida de la mantención de la adecuada humedad relativa del ambiente. - a pérdida de peso depende de la humedad del aire en la cámara de almacenamiento; si la humedad es baja, la pérdida de peso es elevada.

Aire atmosférico

Por sus dimensiones y por los procesos físico-químicos que se produjeron, el planeta Tierra posee hoy una capa gaseosa que lo envuelve (aire atmosférico), la que constituye la atmósfera de la Tierra y es esencial para las formas de vida que se encuentran en ella.

El aire atmosférico se compone de una mezcla de gases, vapor de agua y una mezcla de contaminantes, tales como humo, polvo, y otros elementos gaseosos que no están presentes normalmente, en lugares distantes de las fuentes de contaminación.

Por definición, existe aire seco cuando se ha extraído todo el vapor de agua y los contaminantes del aire atmosférico. Mediante extensas mediciones se ha demostrado que la composición del aire seco es relativamente constante, si bien el tiempo, la ubicación geográfica y la altura determinan pequeñas variaciones en la cantidad de componentes. La composición porcentual, en volumen o número de moles por 100 moles de aire seco, aparece en el Cuadro 1.

Cuadro 1 Composición del aire seco

Substancia	Fórmula	Masa molecular (kg kg-mol ⁻¹)	Porcentajes en volumen (moles/ 100 moles)
Nitrógeno	N ₂	28,016	78,084
Oxígeno	O ₂	32,000	20,9496
Argón	Ar	39,948	0,934
Dióxido de carbono	CO ₂	44,010	0,0314
Neón	Ne	20,183	0,001818
Helio	He	4,0026	0,000524
Metano	CH ₄	16,03188	0,0002

Dióxido de azufre	SO ₂	64,064	0,0001
Hidrógeno	H ₂	2,01594	0,00005
Criptón	Kr	83,800	0,0002
Ozono	O ₃	48,000	0,0002
Xenón	Xe	131,300	0,0002

Fuente: ASHRAE, 1977

La masa molecular aparente del aire seco es de 28,9645 kg-mol y la del vapor de agua es de 18,1535 kg-mol, ambas en la escala del carbono 12 (ASHRAE, 1977). El aire seco, normalmente tiene vapor de agua asociado, lo que da origen al que se denomina aire húmedo, que es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor presente en la mezcla puede variar entre cero y un valor correspondiente al estado de saturación. Esto corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede soportar a una temperatura determinada.

Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Hay diversas propiedades termodinámicas fundamentales ligadas a las propiedades del aire húmedo. Hay dos propiedades independientes, además de la presión atmosférica necesarias para establecer el estado termodinámico del aire húmedo.

Tres propiedades se relacionan con la temperatura:

- a. temperatura de bulbo seco;
- b. temperatura termodinámica de bulbo húmedo;
- c. temperatura del punto de rocío.

Algunas propiedades termodinámicas caracterizan la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo:

- a. presión de vapor;
- b. razón de humedad;
- c. humedad relativa;
- d. grado de saturación.

Otras propiedades de fundamental importancia, relacionadas con el volumen ocupado por el aire y con la energía del aire, respectivamente, son:

- a. el volumen específico,
- b. la entalpía.

La entalpía y el volumen específico son propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua, pero para mayor comodidad se expresan sobre la base de una unidad de masa de aire seco.

La temperatura psicrométrica de bulbo húmedo. (T_{bh}) no es una propiedad termodinámica de la mezcla de aire seco y vapor de agua y se tratará separadamente.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas propiedades.

Temperatura de bulbo seco (T)

La temperatura de bulbo seco, es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se la denomina simplemente temperatura del aire; es la temperatura del aire que marca un termómetro común.

Temperatura de punto de rocío (T_{pr})

La temperatura de punto de rocío, es la temperatura a la cual el aire húmedo no saturado se satura, es decir, cuando el vapor de agua comienza a condensarse, por un proceso de enfriamiento, mientras que la presión y la razón de humedad se mantienen constantes.

Temperatura termodinámica de bulbo húmedo (T^*)

La temperatura termodinámica de bulbo húmedo, es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

Presión de vapor (P_v)

La presión de vapor, es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado (P_{VS}).

Razón de humedad (razón de mezcla) (W)

La razón de humedad del aire, se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en un volumen dado de mezcla. Algunos autores confunden los términos razón de humedad y humedad absoluta; la humedad absoluta, denominada también densidad del vapor de agua, es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua.

Humedad relativa (ϕ)

La humedad relativa del aire, se define como la relación entre la presión de vapor de agua en un momento dado (P_v) y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad (P_{vs}), a la misma temperatura. La humedad relativa se puede expresar como decimal o como porcentaje.

Grado de saturación (μ)

El grado de saturación, es la relación entre la razón de humedad real de la mezcla (W) y la razón de humedad del aire en estado de saturación (W_s), a igual temperatura y presión atmosférica.

Entalpía (h)

La entalpía de la mezcla de aire seco y vapor de agua, es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia; dado que en ingeniería solo las diferencias de entalpía tienen interés práctico, el valor que se escoja para la temperatura de referencia carece de importancia.

Volumen específico (Ve)

El volumen específico del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco. La masa específica del aire húmedo no es igual al recíproco de su volumen específica. La masa específica del aire húmedo es la relación entre la masa total de la mezcla y el volumen que ella ocupa.

Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo

Un psicrómetro (Figura 1) se compone de dos termómetros, uno de ellos envuelto en una tela constantemente humedecida (termómetro de bulbo húmedo) y otro, al lado del primero, en simple equilibrio térmico con el aire atmosférico (termómetro de bulbo seco). El termómetro de bulbo húmedo recibe sobre sí un flujo de aire constante por medio de un sistema de ventilación. Se evapora así la humedad y se retira energía del bulbo húmedo. La temperatura baja, y al llegar al punto de equilibrio, se estabiliza. La temperatura que registra el termómetro en esas condiciones se llama temperatura psicrométrica de bulbo húmedo. (T_{bh})

Se entiende por estado de equilibrio la situación en que el flujo de energía del aire al bulbo del termómetro es igual a la energía necesaria para la evaporación de la humedad. En ese estado de equilibrio, a partir de un balance de energía, se puede escribir la ecuación siguiente

$$P_v = P_{vS,bh} - a_1 P(T - T_{bh})$$

ec.1

en que a_1 se denomina constante psicrométrica, y depende de la temperatura, de la geometría del bulbo del termómetro y de la velocidad del aire. Varios investigadores determinaron empíricamente los valores de la constante psicrométrica, con los siguientes resultados:

$a_1 = 0,000662 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - para psicrómetros con sistema de movimiento de aire (aspiración) de tipo ASSMANN, donde la velocidad del aire es mayor que 3 m/s.

$a_1 = 0,000800 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - para psicrómetros sin aspiración de aire, instalado en una caseta meteorológica, donde la velocidad del aire es del orden de 1 m/s.

$a_1 = 0,00120 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - para psicrómetros no ventilados, es decir, aire sin movimiento (en reposo).

[Figura 1. Esquema de un psicrómetro con sistema de aspiración de aire psicrómetro de aspiración](#)

Grafico psicrometrico

[Determinación de las propiedades en un punto de estado](#)

[Calentamiento y enfriamiento sensible del aire](#)

[Enfriamiento con deshumedecimiento](#)

[Secado y humedecimiento adiabático del aire](#)

[Humedad relativa y déficit de presión de vapor](#)

[Tabla psicrométrica](#)

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico, se pueden presentar adecuadamente en forma de gráfico, con el nombre de gráfico psicrométrico, el cual se construye según una presión atmosférica determinada, aunque suele haber curvas de corrección para otras presiones.

Hay diferentes gráficos psicrométricos en uso. Ellos difieren en cuanto a la presión barométrica, la banda de

temperaturas, número de propiedades comprendidas, elección de las coordenadas y temperatura de referencia para la entalpía. El de uso más frecuente en EE.UU. es aquel en que la razón de humedad o la presión de vapor, que es una de las coordenadas, se grafica en función de la temperatura de bulbo seco, y en que la otra coordenada que se escoge para la construcción (coordenada oblicua) es la entalpía. En Europa en cambio, se usa el gráfico de MOLLIER, cuyas coordenadas son la razón de humedad y la entalpía. En las Figuras 2 y 3 se ven gráficos psicrométricos de temperaturas normales y temperaturas elevadas, construidos con presión atmosférica normal. Al final del texto se presentan gráficos de presiones atmosféricas inferiores a la normal.

En el gráfico psicrométrico, una vez elegidos las coordenadas, las demás propiedades aparecen como parámetros. Dos propiedades independientes cualesquiera, incluso la temperatura psicrométrica de bulbo húmedo, fijan el estado de la mezcla (punto de estado).

La Figura 4 muestra en forma esquemática las líneas que representan las propiedades termodinámicas del aire húmedo en el gráfico psicrométrico.

Determinación de las propiedades en un punto de estado

Supongamos que se ha determinado, por medio de un psicrómetro ventilado, la temperatura de bulbo seco 25 °C, y la temperatura de bulbo húmedo 20 °C. Mediante el gráfico psicrométrico se pueden determinar las demás propiedades termodinámicas del aire húmedo. En el Cuadro 2 se muestran los valores de las propiedades del aire húmedo, definidas en ese punto de estado, obtenidos del gráfico psicrométrico (Figura 5), en el cual se representa el punto de estado número 1.

[FIGURA 2 - GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 101,325 kPa](#)

[FIGURA 3 - GRAFICO PSICROMETRICO, ALTAS TEMPERATURAS, PRESION ATMOSFERICA 101,325 kPa](#)

Figura 4. Gráficos psicrométricos que representan las líneas de las propiedades del aire.

Cuadro 2 Propiedades termodinámicas del aire húmedo definidas en un punto de estado

Punto de estado	P	T	T _{bh}	T _{pr}	P _v	φ	V _e	W	h
T = 25°C									
T _{bh} = 20°C	101,325	--	-	17,7	2,1	65	0,86	0,0127	57,5

Figura 5. Gráfico psicrométrico con representación de las propiedades termodinámicas del aire húmedo, definidas en un punto de estado.

Para complementar los conocimientos, se propone que se determinen las propiedades termodinámicas del aire en los puntos de estado constante del Cuadro 3, utilizando el gráfico psicrométrico.

Cuadro 3 Propiedades termodinámicas del aire húmedo definidas en varios puntos de estado

Punto de estado	P	T	T _{bh}	T _{pr}	P _v	φ	V _e	W	h
T = 26°C	101,325	-	-	15,5	1,75	52	0,861	0,011	54
T _{bh} = 19°C									
T = 22°C	101,325	-	16	12,5	1,5	-	0,848	0,009	45
φ = 55%									
T = 15°C	101,325	-	14,2	-	1,6	93	0,829	0,010	40

T _{pr} = 14 °C									
T = 23 °C	101,325	-	-	17,0	2,0	69	0,855	0,0121	54
T _{bh} = 19 °C									

[Indice](#) - [Siguiete](#) >

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

Calentamiento y enfriamiento sensible del aire

[Indice](#) - < [Precedente](#) - [Siguiete](#) >

Cuando se entrega energía al aire, la temperatura aumenta, pero la razón de humedad permanece constante, pues no hay aumento ni disminución en la cantidad de masa de la mezcla (aire seco y vapor de agua). Igual cosa sucede con el enfriamiento del aire; se retira energía y la razón de humedad permanece constante. Por tanto, los procesos de calentamiento y enfriamiento del aire aparecen en el gráfico con líneas horizontales, paralelas a la abscisa, a partir del punto de estado en que se encuentra el aire. En la Figura 6, el aire cuyas propiedades termodinámicas están en el punto de estado definido por $T = 25 \text{ °C}$ y $T_{bh} = 20 \text{ °C}$, pasa primero por un proceso de calentamiento hasta la temperatura de 46 °C ; en otro proceso, pasa por enfriamiento hasta la temperatura de 20 °C . En el Cuadro 4, están los valores de las propiedades del aire al término de los procesos de calentamiento y enfriamiento señalados en el gráfico psicrométrico (Figura 6).

[Figura 6. Representación del calentamiento y enfriamiento del aire húmedo en el gráfico psicrométrico](#)

Cuadro 4 Propiedades termodinámicas del aire en los procesos de calentamiento y enfriamiento

Propiedades	Calentamiento		Enfriamiento	
	Punto de estado		Punto de estado	
	1	2	1	3
T	25,0	46,0	25,0	20,0
Tbh	20,0	26,0	20,0	18,6
ϕ	65,0	20,0	65,0	87,0
Pv	2,1	2,1	2,1	2,1
W	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127
h	57,5	80,0	57,5	52,5
Ve	0,86	0,922	0,86	0,847
Tpr	17,7	17,7	17,7	17,7

Durante el calentamiento, de 25°C a 46°C la entalpía del aire pas de $h_1 = 57,5$ kJ/kg de aire seco a $h_2 = 80,0$ kJ/kg de aire seco, lo que significa que es preciso proporcionar 22,5 kJ/kg de aire seco para llevar la masa de aire del punto de estado 1 al punto de estado 2. Durante el enfriamiento de 25 a 20 °C hay que retirar 5 kJ/kg de aire seco para llevar el aire del punto de estado 1 al punto de estado 3.

Enfriamiento con deshumedecimiento

El enfriamiento del aire, cuando se alcanza la curva de humedad relativa máxima ($\phi = 100\%$), se tiene en el punto de roci. El enfriamiento de ese aire, mover el punto de estado sobre la línea de saturación, con lo que se condensa una parte del vapor de agua presente en el aire. En consecuencia, la razón de humedad disminuir.

Figura 7. Representación del enfriamiento con deshumedecimiento del aire húmedo en el gráfico psicrométrico

La Figura 7 muestra el enfriamiento de una masa de aire con sus propiedades termodinámicas definidas en el punto de estado 1 ($T = 25 \text{ °C}$ y $T_{bh} = 20 \text{ °C}$) hasta el punto de estado 4. Se observa que el punto de estado se desplaza horizontalmente hacia la izquierda hasta llegar a la línea de saturación, lo que indica que se alcanza el punto de rocío (punto 4). Si el enfriamiento continúa hasta la temperatura de 14 °C (punto 5), habrá condensación de $0,0027 \text{ kg}$ de vapor/kg de aire seco, y la entalpía del aire disminuirá en $18,5 \text{ kJ/kg}$ de aire seco. En el Cuadro 5 constan los valores de las propiedades termodinámicas del aire en el proceso descrito.

Cuadro 5 Propiedades termodinámicas del aire en el proceso de enfriamiento con deshumedecimiento

Propiedades	Enfriamiento con deshumedecimiento		
	Punto de estado		
	1	4	5
T	25,0	17,7	14,0
Tbh	20,0	17,7	14,0
ϕ	65,0	100,0	100,0
Pv	2,1	2,1	1,6
W	0,0127	0,0127	0,010
h	57,5	50,0	39,0
Ve	0,86	0,84	0,827
Tpr	17,7	17,7	14,0

Secado y humedecimiento adiabático del aire

La adición de humedad al aire o su extracción de él, sin aumentar ni disminuir la energía, hace que el punto de estado se mueva sobre una línea de entalpía constante. Si se trata de agregar humedad, el punto se desplaza hacia arriba y si se trata de retirar humedad, se desplaza hacia abajo. La Figura 8 señala que el aire húmedo, en las condiciones iniciales (punto de estado 1) tiene una temperatura de bulbo seco (T) de 25 °C y una razón de humedad (W) de 0,0127 kg de vapor por kg de aire seco. Al aumentar en 0,0013 kg de vapor de agua, el punto de estado se desplaza hasta el punto 6 (W = 0,014). Partiendo nuevamente de las condiciones iniciales (punto de estado 1), al retirar 0,0017 kg de vapor, el punto de estado se desplaza hasta el punto 7 (W = 0,011). Se observa que la entalpía del aire permanece constante, 53 kJ/kg de aire seco. En el Cuadro 6 se presentan las propiedades termodinámicas del aire en los puntos 1, 6 y 7.

[Figura 8. Representación del secado y humedecimiento adiabático del aire en el gráfico psicrométrico.](#)

Cuadro 6 - Propiedades termodinámicas del aire en los procesos de secado y humedecimiento adiabático

Propiedades	Secado y humedecimiento adiabático		
	Punto de estado		
	1	6	7
T	25,0	22,0	29,2
Tbh	20,0	20,0	20,0
ϕ	65,0	85,0	43,0
Pv	2,1	2,3	1,8

W	0,0127	0,014	0,011
h	57,5	57,5	57,5
Ve	0,86	0,854	0,87
Tpr	17,7	19,0	15,5

Las operaciones de calentamiento, enfriamiento, secado y humedecimiento del aire tienen especial Importancia en los trabajos de manejo, secado y almacenamiento de productos biológicos.

Humedad relativa y déficit de presión de vapor

La medida de la humedad relativa del aire se puede obtener mediante las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, medidas con un psicrometro. La disminución de la temperatura de bulbo húmedo depende de la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, además de la velocidad del aire en torno a la tela embebida en agua destilada. El déficit de saturación se encuentra por la diferencia entre la presión de vapor de agua saturado (P_{VS}) y la presión de vapor real del aire (P_v), a la temperatura en que se encuentra el aire. Cuando se conoce la temperatura del aire, la presión del vapor de agua saturado (P_{VS}), se puede obtener en el Cuadro 7, en unidades del Sistema Internacional de Unidades (Si).

La presión de vapor de agua real (P_v), se puede calcular con la ecuación siguiente:

$$P_v = P_{VS,bh} - a_1 P (T - T_{bh}) \text{ ec.1}$$

y la presión atmosférica, de acuerdo a la altura del lugar, se puede buscar en el Cuadro 3A del Apéndice. Luego, recordando que la humedad relativa del aire la da

$$\phi = \frac{P_V}{P_{VS}} \times 100$$

se puede determinar la humedad relativa del aire en lugares en que no se dispone de gráficos psicrométricos, de acuerdo con la altura local, o incluso en situaciones en que no se dispone de psicrómetros con sistema de movimiento de aire.

A continuación se presenta un caso ilustrativo en que se trata de calcular la humedad relativa del aire, a partir de las condiciones siguientes: temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo iguales a 28°C y 21,5°C respectivamente, medidas con psicrómetro sin sistema de movimiento de aire, instalado en una caseta meteorológica. La altura del lugar es de 700 metros sobre el nivel del mar.

- para 700 metros de altura sobre el nivel mar, en el Cuadro 3A del Apéndice la presión atmosférica tiene un valor de 933 mbar;
- para un psicrómetro sin ventilación forzada, instalado en caseta meteorológica, la constante psicrométrica tiene un valor de $a = 0,000800 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- en el Cuadro 2A del Apéndice, para $T_{bh} = 21,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, se tiene que $P_{VS, T_{bh}} = 25,6 \text{ mbar}$; y para $T = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$ se tiene $P_{VS} = 37,8 \text{ mbar}$;
- por la ecuación 1 se tiene que

$$P_V = 25,6 - (0,000800 \times 933) \times (28 - 21,5)$$

$$P_V = 20,75 \text{ mbar}$$

- por la ecuación 2 se tiene que

$$\phi = 307,8 \times 100$$

$$\phi = 55,0\%$$

En muchos casos, lo habitual es expresar la humedad del aire en términos de humedad relativa, como se hace en situaciones en que se supone que el contenido de humedad de un producto biológico está en equilibrio con la humedad y temperatura del aire, pasado un lapso prolongado. En otros casos, en cambio, la tasa a la cual se produce un fenómeno, como consecuencia de una reacción a las condiciones de humedad del aire, está mucho más relacionada con el déficit de presión de vapor que con la humedad relativa.

Tabla psicrométrica

El cuadro 8 se emplea en la determinación de la humedad relativa del aire, cuando se conocen las temperaturas de bulbo seco T , y de bulbo húmedo T_{bh} . Dicha tabla se prepara para presión atmosférica normal (nivel del mar). El Cuadro 8 es de doble entrada: la temperatura del termómetro de bulbo seco T , se encuentra en la primera columna y la depresión psicrométrica ($T - T_{bh}$) en la primera línea. Los diversos valores de humedad relativa constituyen el cuerpo de la tabla. Así, por ejemplo, para una temperatura de bulbo seco (T) de 28°C y temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) de 25°C se encuentra en la primera columna el valor correspondiente a $T = 28^\circ\text{C}$ (véase el Cuadro 8). Siguiendo horizontalmente hasta la columna cuya depresión psicrométrica es 3°C se encuentra el valor de $\phi = 78\%$ de humedad relativa del aire.

[Cuadro 7 Tabla de presión de vapor de agua saturado \(kPa\), para presión atmosférica de 101,325 kPa](#)

[Cuadro 8 Tabla psicrométrica para presión atmosférica normal](#)

Ecuaciones psicrométricas

Hay en la literatura ecuaciones exactas y termodinámicamente congruentes para la razón de humedad, volumen específico, entalpía, grado de saturación y presión de vapor de agua saturado. Dichas ecuaciones se elaboraron sobre la base de los conceptos de termodinámica estadística, tomando en cuenta las fuerzas intermoleculares que hacen que el aire atmosférico se comporte como un gas no ideal. En ASHRAE (1977) se publican tablas de las propiedades del aire húmedo, construidas a partir de dichas ecuaciones.

Por la complejidad de las ecuaciones que se utilizaron en la preparación de dichas tablas, se elaboraron ecuaciones simplificadas que suministran resultados aproximados a los valores reales, sobre la base del supuesto de que el aire húmedo se comporta como un gas ideal. Estas ecuaciones simplificadas son las que se usan para calcular parámetros psicrométricos a presiones atmosféricas diferentes de las que se usaron para construir las tablas y gráficos psicrométricos, y son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones en ingeniería. En cambio, para fines que exijan resultados exactos, las ecuaciones de los gases ideales son en cierto modo limitadas.

A continuación se presentan las ecuaciones psicrométricas, cuyos símbolos están definidos en la lista que viene al final de este capítulo; las unidades pertenecen al sistema internacional (SI).

1. Línea de saturación, P_{VS}

$$P_{VS} = \exp\left(31.9602 - \frac{6270,3605}{T} - 0,46057 \ln T\right)$$

ec.3

$$255,38 \leq T \leq 273,16 \text{ K}$$

$$P_{VS} = \exp\left(60,433 - \frac{6834,271}{T} - 5,16923 \ln T\right)$$

ec.4

$$273,16 \text{ K} \leftrightarrow T \leftrightarrow 366,5 \text{ K}$$

$$\ln\left(\frac{P_{VS}}{b_8}\right) = \frac{b_1 + b_2 T + b_3 T^2 + b_4 T^3 + b_5 T^4}{b_6 T - b_7 T^2}$$

ec.5

$$273,16 \text{ K} \leftrightarrow T \leftrightarrow 533,16 \text{ K}$$

en que

$$b_1 = -27405,526$$

$$b_2 = 97,5413$$

$$b_3 = 0,146244$$

$$b_4 = 0,12558 \times 10^{-3}$$

$$b_5 = 0,48502 \times 10^{-7}$$

$$b_6 = 4,34903$$

$$b_7 = 0,39381 \times 10^{-2}$$

$$b_8 = 22105649,25$$

2. Humedad relativa, ϕ

$$\phi = \frac{P_V}{P_{VS}}$$

ec.2

3. Razón de humedad, W

$$W = 0,62198 \frac{P_V}{(P - P_V)}$$

ec.6

$$255,38 \text{ K} < T < 533,16 \text{ K}$$

$$P_V < P$$

4. Volumen específico, V_e

$$V_e = \frac{287,05 T}{(P - P_V)}$$

ec.7

$$255,38 \text{ K} < T < 533,16 \text{ K}$$

$$P_V < P$$

5. Entalpía de sublimación de agua en la saturación h_{sg}

$$h_{sg} = 2839683,144 - 212,563884 (T - 255,38)$$

ec.8

255,38 °C T = 273,16 K

6. entalpía de vaporización del hielo en la saturación, h_{lg}

$$h_{lg} = 2502535,259 - 2385,75424 (T-273,16)$$

ec.9

273,16 °C T = 338,72 K

$$h_{lg} = (7329155978000 - 15995964,08 T^2)^{1/2}$$

ec.10

338,72 °C T = 533,16K

7. Línea de bulbo húmedo T_{bh}

$$P_{VS,bh} - P_V = B (T_{bh} - T)$$

en que

$$B = \frac{1006,9254(P_{VS,bh} - P)(1 + 0,15577 \frac{P_V}{P})}{0,62194 h''_{lg}}$$

Se reemplaza h''_{lg} por h''_{sg} , cuando $T < 273,16$

255,38 °C T = 533,16K

8. Entalpía, h

$$h = 1006,92540 (T - 273,16) - W[333432,1 + 2030,5980$$

$$(273,16 + T_{pr})] + h'_{sg}W + 1875,6864 W(T-T_{pr})$$

ec.11

$$255,30 \Leftrightarrow T_p, \Leftrightarrow 273,16 \text{ K}$$

$$h = 1006,92540 (T - 273,16) + 4186,8 W (T_{pr} - 273,16) + h'_{lg}W + 1875,6864 W(T-T_{pr})$$

ec.12

$$273,16 \Leftrightarrow T_{pr} \Leftrightarrow 373,16 \text{ K}$$

9. Temperatura del punto de rocío, T_{pr} ,

$$T_{pr} = c_1 (10^{-3} P_V)^{c_2} + c_3 \ln (10^{-3} P_V) + c_4$$

ec.13

a) para 0,16 s P_V s 610,74 N/m²:

$$c_1 = 82,44543$$

$$c_2 = 0,1164067$$

$$c_3 = 3,056448$$

$$c_4 = 196,814270$$

b) para 610,74 P_V \Leftrightarrow 101340 N/m²:

$$c_1 = 33,38269$$

$$c_2 = 0,2226162$$

$$c_3 = 7,156019$$

$$c_4 = 246,764110$$

c) para 101340 \diamond PV \diamond 4688500 N/m \diamond :

$$c_1 = 13,85606$$

$$c_2 = 0,2949901$$

$$c_3 = 12,10512$$

$$c_4 = 263,128720$$

La mayor \diamond a de las veces se obtiene el valor de la temperatura de bulbo seco junto con otro par \diamond metro psicrom \diamond trico, esto es, temperatura de bulbo h \diamond medo, humedad relativa o temperatura de punto de rocío. A partir de dichas mediciones se puede obtener una o todas las dem \diamond s propiedades termodin \diamond micas del aire h \diamond medo. Las ecuaciones presentadas se pueden usar para calcular dichas propiedades del aire h \diamond medo. El orden en que se apliquen depende sobre todo de los par \diamond metros conocidos.

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

3. Higroscopia

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

Fenomeno de "sorcion"Isotermas de sorcionModelos de equilibrio higroscopicoEcuaciones de humedad de equilibrio para diversos productosMetodos experimentales para obtener el equilibrio higroscopicoEntalpia de vaporizacion

El agua participa activamente en la formaci3n de los granos de cereales y de aginosas, pues es el veh3culo de transporte de las sustancias nutritivas, a partir de hojas y ra3ces, que mediante procesos bioqu3micos se polimerizan en almid3n, l3pidos y prote3nas, durante la fase de maduraci3n. Cuando alcanza la madurez fisiol3gica, el grano se independiza de la planta y, seg3n las condiciones psicrom3tricas del aire (temperatura y humedad relativa), pierde humedad hasta el momento de la cosecha.

El comportamiento de los granos y de sus productos durante el almacenamiento depende de la temperatura y del contenido de humedad que presenta el producto. No se puede emprender ning3n an3lisis de esta materia sin referirse a dichos par3metros. El contenido de humedad, es decir, la cantidad de agua contenida en el grano, se puede expresar tanto en base h3meda como en base seca. La humedad con base h3meda, H_{bh} , y la humedad con base seca, H_{bs} , se definen respectivamente con las ecuaciones 14 y 15: donde m_w es la masa del agua, m_s es la masa de la materia seca y m_t es la masa total.

$$H_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{m_w}{m_t}$$

ec.14

$$H_{bs} = \frac{m_w}{m_s}$$

ec.15

El contenido de humedad con base húmeda se puede expresar tanto en decimal como en porcentaje (parte de los componentes del material en relación con el total); en cambio, el contenido de humedad con base seca sólo tiene sentido si se expresa en decimal, puesto que se trata de una relación entre componentes del material. En el comercio y la industria se emplea mayormente el contenido de humedad con base húmeda, mientras que en ciencia el contenido de humedad con base seca resulta más adecuado.

Para comprender el papel que desempeña el agua de los granos en los procesos de secado y almacenamiento, es preciso comprender primero los principios básicos que intervienen en la fijación del agua por los componentes químicos de los granos. Cuando dichos principios estén claros se puede apreciar todo el alcance de los diversos aspectos prácticos que tiene la relación entre el agua contenida en los granos y los procesos de secado y almacenamiento.

Fenomeno de "sorcion"

El agua contenida en los granos se presenta en distintas formas, en función de la naturaleza de las ligazones químicas que existen entre los componentes de la materia seca y las moléculas de agua, lo que determina los diferentes niveles de hidratación del producto.

Una parte del agua está estrechamente vinculada con la sustancia adsorbente. Se compone de una capa monomolecular ligada a determinados agrupamientos moleculares fuertemente polarizados, tales como los hidroxilos (OH). Puede estar combinada con la sustancia por medio de ligazones químicas, o sea, es parte integrante de una sustancia dada. Esta forma de agua se la puede eliminar sólo bajo rigurosas condiciones de temperatura y tiempo, como las que se emplean para determinar la humedad de los granos en estufa.

También se encuentra en los granos una cantidad de agua contenida en una capa polimolecular que se fija sobre la aludida capa monomolecular. Las distintas capas monomoleculares que componen la capa polimolecular están ligadas a la materia por medio de ligazones electromagnéticas y forman agua pseudoligada, no solvente, sin papel biológico y fuertemente adsorbida.

Los granos contienen además agua líquida bajo tensión osmótica. Se trata de agua solvente que retienen diferentes sustancias en las células del material biológico; aparece débilmente adsorbida, cumple un papel biológico y puede permitir las reacciones químicas (enzimáticas), además del desarrollo de hongos; se elimina, en gran parte, con el secado.

Cierta cantidad de agua se puede mantener libremente en los espacios correspondientes a los poros de los granos, es decir, se mantiene débilmente en el sistema gracias a fuerzas capitales. Esta cantidad de agua se conoce como agua de impregnación; algunos investigadores la llaman agua libre o adsorbida. Tiene las mismas propiedades que el agua libre. Las paredes celulares la retienen mecánicamente en el grano; las moléculas de las sustancias adsorbentes no se ven afectadas, actúan sólo como estructura de soporte. La presencia de agua libre en el grano lo inhabilita para el almacenamiento, puesto que puede favorecer el desarrollo de hongos y bacterias. Este tipo de agua se evapora fácilmente en el secado.

De acuerdo con lo anterior, el agua está adsorbida, es decir, se mantiene en los granos gracias a fuerzas de atracción molecular, o bien está firmemente ligada a la sustancia adsorbente. El término general "sorción" se usa para denotar esta interacción agua-sustancia adsorbente. Los términos generales adsorción y desorción se usan especialmente para denotar el proceso de ganar o perder agua por medio de sorción.

Esta clasificación de los tipos de agua presente en los granos no es más que una clasificación en categorías habituales. Cabe tener presente que en los sistemas coloidales, tales como los granos, que están compuestos de varias sustancias y poseen una estructura organizada, se presentan muchos tipos de agua ligada en el abanico que va desde el agua libre al agua ligada químicamente.

La Figura 9 muestra un ambiente (aire) con una temperatura determinada (T) y humedad relativa ϕ constantes, en el cual est colocado un grano de cereal.

La humedad relativa del aire del ambiente representado en la Figura 9 est dada por la ecuaci n:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100$$

La presi n parcial del vapor de agua que existe en el micro ambiente (capa de aire limite) en contacto con el grano es P_{vg} . Cuando el grano est en equilibrio higrosc pico con el aire que lo envuelve, hay intercambio rec proco de humedad (agua) entre el aire y el grano, porque no hay diferencia de presi n parcial de vapor entre la humedad de la superficie del grano y la del aire. Se tiene, por tanto:

$$P_v = P_{vg}$$

ec. 16

La actividad del agua del grano, A_w , se define como:

$$A_w = P_{vg}/P_{vs}$$

ec.17

En el equilibrio higrosc pico, la actividad del agua de los granos es id ntica a la de la humedad relativa del aire. En tal caso,

$$A_w = \phi = P_v/P_{vs}$$

ec. 18

y el contenido de humedad del grano es igual al contenido de humedad de equilibrio, para las condiciones de

temperatura y humedad relativa del aire.

Figura 9. Presiones parciales del vapor de agua en el aire P_v y en la superficie del grano P_{vg} .

Isotermas de sorcion

La humedad de equilibrio se define como el contenido de humedad de un material higroscópico después de estar expuesto a un ambiente en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, durante un lapso prolongado. Se puede decir, además, que el material está en equilibrio higroscópico con el ambiente en que se encuentra cuando la presión de vapor de agua correspondiente a la humedad del material es igual a la presión de vapor de agua del aire ambiente. Para cada especie o variedad de material, la tensión de vapor tiene un valor característico acorde con la temperatura y el contenido de humedad del material.

La importancia que tiene la obtención de datos experimentales de equilibrio higroscópico de los productos agrícolas es bien conocida. Dada la importancia de este concepto, por sus innumerables aplicaciones en el secado, almacenamiento y manejo de los productos agrícolas, se han desplegado esfuerzos para obtener ecuaciones que expresen el contenido de humedad de equilibrio respecto de cada producto, en función de la humedad relativa y la temperatura del aire.

La utilidad de obtener esas ecuaciones son múltiples: a) las variaciones continuas de temperatura y humedad del aire en contacto con los productos almacenados originan cambios en el contenido de humedad de equilibrio. En las investigaciones relativas al almacenamiento, frecuentemente es preciso calcular dicho tenor de humedad por medio de dichas ecuaciones; y b) en los cálculos de secado, independientemente del sistema de secado que se ocupe, los valores de contenido de humedad de equilibrio se calculan incontables veces. Cabe destacar también la importancia de conocer esas ecuaciones de equilibrio higroscópico, para calcular la entalpía de la vaporización del agua de los productos biológicos en los procesos de secado.

Los valores del contenido de humedad de equilibrio de los productos biológicos dependen, principalmente, de la temperatura y de la humedad relativa del aire, de la especie o variedad del producto. La madurez fisiológica y la historia del producto, junto con la manera en que se obtuvo el equilibrio (adsorción o desorción), también influyen en la humedad de equilibrio.

Los materiales biológicos presentan la isoterma de sorción del tipo mostrado en la Figura 10. Una isoterma es simplemente una curva que relaciona el contenido de humedad de equilibrio de un producto, con la humedad relativa del aire o actividad de agua del producto.

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico, en determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa de equilibrio, depende del camino que se siga para alcanzar el equilibrio. Así, para una misma humedad relativa, puede haber dos isotermas, denominadas isotermas de adsorción y de desorción, obtenidas en función de las condiciones experimentales iniciales. Esto, porque el material puede presentar un contenido de humedad menor o mayor que la humedad de equilibrio para las condiciones del ambiente. Este fenómeno se llama histéresis. Las isotermas tienen forma sigmoidal, pues la isoterma de desorción presenta valores de humedad de equilibrio superiores al de la isoterma de adsorción (Figura 11).

[Figura 10. Isotermas de sorción de agua del maíz.](#)

[Figura 11. Isotermas de adsorción y desorción, representación del fenómeno de](#)

En la literatura consultada no se encontró ninguna explicación concluyente acerca del fenómeno de la histéresis. Una de las explicaciones es la teoría del "frasco de tinta", que aparece en varios trabajos. CHUNG y PFOST, (1976) pretenden explicar el fenómeno sobre la base de la contracción del volumen que se produce durante la desorción de humedad en el proceso de secado. Es decir, la reducción de volumen del producto acarrea la disminución de los puntos de ligazón disponibles para ligar el agua con las moléculas de las sustancias, lo que conduce a la histéresis. Hay otras hipótesis acerca de este tema en la literatura.

Modelos de equilibrio higroscopico

Se han propuesto diversos modelos teóricos, semi teóricos y empíricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio de los granos. Pese a las investigaciones en este campo, ningún modelo teórico ha sido capaz hasta ahora de predecir exactamente el contenido de humedad de equilibrio de granos en todas las gamas de temperatura y humedad relativa. Además, sólo algunos modelos tienen en cuenta la temperatura como parámetro. Se han propuesto modificaciones a diversas ecuaciones y, en este caso, la gama de validez aumenta sustancialmente. En el Cuadro 9 se muestran los modelos más comunes de isothermas de sorción.

La ecuación de Kelvin se aplica solamente a las humedades relativas superiores a 95% y la ecuación de Langmuir no se aplica a productos alimenticios. La ecuación de BET y la versión que presenta Rounsley permiten estimar la parte de agua adsorbida en relación con el total de agua ligada. Las ecuaciones de BET, Harkins-Jura y Rounsley, ofrecen resultados aceptables solamente para valores de humedad relativa inferiores a 30%. La ecuación de Henderson y la de Chung-Pfost son las que mejor expresan el contenido de humedad de equilibrio de granos en gamas más amplias de temperatura y humedad relativa. Las modificaciones empíricas mejoraron sustancialmente dichas ecuaciones y las hicieron aplicables a una mayor parte del abanico de temperaturas y humedades relativas.

Ecuaciones de humedad de equilibrio para diversos productos

Ecuación de Henderson modificada

$$H_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - \phi)}{-c_1(T + c_2)} \right]^{1/c_3}$$

ec.27

$$\phi = 1 - \exp [-c_1 (T + c_2) (100 - H_e)^{c_3}],$$

ec.28

en que la humedad relativa ϕ se expresa en decimal y la temperatura T en $^{\circ}\text{C}$.

El Cuadro 10 muestra los valores de los parámetros de la ecuación de Henderson modificada, respecto de diversos productos.

Ecuación de Chung-Pfost

$$H_e = d_1 - d_2 (\ln - (T + d_3) \ln \phi)$$

ec.29

$$\phi = \exp \left(\frac{d_4}{T + d_3} \exp(-d_5 H_e) \right)$$

ec.30

en que la humedad relativa ϕ se expresa en decimal y la temperatura T en $^{\circ}\text{C}$.

Cuadro 9 Ecuaciones de isotermas de sorción

ECUACION	AUTOR	
$\phi = \exp \frac{2\sigma \cos \alpha}{RTd}$	Kelvin (1871)	ec.19

$\frac{H}{H_1} = \frac{K_1 \phi}{1 + K_1 \phi}$	Langmuir (1918)	ec.20
$\frac{H}{H_1} = \frac{K_2 \phi}{(1 - \phi)(1 - \phi + H_2 \phi)}$	B.E.T (1938)	ec.21
$\phi = \exp(k_3 - K_4/H^2)$	Harkins-Jura(1944)	ec.22
$H = k_5 - k_6 \ln(1 - \phi)$	Smith (1947)	ec.23
$\phi = 1 - \exp[-(k_7 TH^{k_8})^9]$	Henderson(1952)	ec.24
$\frac{H}{H_1} = \frac{K_8 \phi}{1 + (K_8 - 1)\phi} \cdot \frac{(1 - \phi)}{(1 - \phi)}$	Rounsley (1961)	ec.25
$\phi = \exp \left[-\frac{K_9}{RT} \exp(-K_{10}H) \right]$	Chung-Pfost (1967)	ec.26

Fuente: FORTES y OKOS (1981)

Cuadro 10 Parámetros de la ecuación de Henderson modificada, respecto de diversos productos

PRODUCTO	c ₁	c ₂	c ₃
Cebada	2,2919 x 10 ⁻⁵	195,267	2,0123
Frijol comestible	2,0899	254,23	1,8812
Maíz	8,6541	49,810	1,8634

Maíz en grano	65,0413	50,561	1,4984
Maíz con cascara	6,6587	23,318	2,5362
Arroz con cascara	1,9187	51,161	2,4451
Sorgo	0,8532	113,725	2,4757
Soja	30,5327	134,136	1,2164
Trigo (durum)	2,5738	70,318	2,2110
Trigo (duro)	2,3007	55,815	2,2857
Trigo (blando)	1,2299	64,346	2,5558
Yuca	0,2892	64,3551	1,7267
Cacao	4,1942	0,0	2,7296
Frijol negro	3,7198	273,16	1,6260

Fuente: ASAE (1981); BACH (1979); SILVA (1979); FIOREZE (1982).

El Cuadro 1 1 muestra los valores de los parámetros empíricos de la ecuación de Chung-Pfost respecto de diversos productos.

Metodos experimentales para obtener el equilibrio higroscópico

Hay dos métodos para la obtención experimental de contenidos de humedad de equilibrio: el estático y el dinámico. En el método estático, las muestras se colocan en recipientes con humedad relativa y temperatura controladas, hasta que alcancen el equilibrio higroscópico, sin que haya movimiento de aire. Existe también otro método estático, en que una muestra de granos relativamente grande se coloca en un recipiente herméticamente

cerrado dotado de un dispositivo higrosensor para determinar la humedad relativa. Cuando se alcanza el equilibrio higroscópico, no se producen variaciones apreciables en los valores de humedad relativa en el aire intersticial.

Cuadro 11 Parámetros de la ecuación de Chuag-Pfost respecto de diversos productos

PRODUCTO	d₁	d₂	d₃	d₄	d₅
Cebada	0,38363	0,050279	91,323	761,66	19,889
Frijol comestible	0,43001	0,062596	160,629	962,58	15,975
Maíz	0,33872	0,058970	30,205	312,30	16,058
Maíz en grano	0,18948	0,034196	33,892	254,90	29,243
Maíz con cascara	0,16510	0,026383	12,354	522,01	37,903
Arroz con cascara	0,29394	0,046015	35,703	594,61	21,732
Sorgo	0,35649	0,050907	102,849	1099,67	19,644
Soja	0,41631	0,071853	100,288	328,30	13,917
Trigo (durum)	0,37761	0,055318	112,350	921,65	18,077
Trigo (duro)	0,35616	0,056788	50,998	529,43	17,609
Trigo (blando)	0,27908	0,043360	35,662	726,49	23,607

Fuente: ASAE (1981).

Diversas sustancias químicas poseen la característica de retirar o ceder humedad del ambiente en que se encuentran, hasta que se alcanza un estado de equilibrio. Las sustancias que así se comportan se denominan materiales higroscópicos, y el contenido de humedad, cuando están en equilibrio con la atmósfera circundante, se

conoce como contenido de humedad de equilibrio.

El método dinámico consiste en hacer pasar el aire, con humedad relativa y temperatura controladas, a través de la muestra, o vice versa, hasta que no haya variación de masa en la muestra. Este método permite obtener el equilibrio higroscópico en un lapso inferior al que necesita el método estático, en las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa.

El estado de humedad relativa se puede mantener constante al interior de recipientes herméticamente cerrados, con soluciones de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y etilen glicol, las que mantendrán la humedad relativa constante en cualquier valor que se desee; solo basta con variar la concentración. Se pueden emplear también soluciones saturadas de diferentes sales, las que han sido preferidas por muchos autores por las ventajas siguientes:

a) la misma solución de sal se puede usar con diversas temperaturas, sin grandes variaciones en el valor de la humedad relativa; b) las sales son menos corrosivas que los ácidos y causan menos daño a los operadores durante su manejo; y c) aunque el material higroscópico pierda o gane humedad en cantidades relativamente grandes, la solución permanece saturada, siempre que se deje un depósito de cristales de sal en el fondo de la solución.

Un inconveniente es la dificultad de encontrar sales que abarquen toda la gama de humedad relativa que interesa. En los Cuadros 12 y 13 aparecen los datos de humedades relativas, en función de la temperatura, que se mantienen con soluciones de diversas sales.

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

Entalpía de vaporización

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

La entalpía de vaporización se define como la energía necesaria para que una unidad de masa de una sustancia pase del estado líquido al estado gaseoso. Si se trata de productos biológicos, tales como los granos, se define como la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en el producto.

Cuadro 12

Humedades relativas mantenidas con soluciones saturadas de sales a distintas temperaturas

Sal	Temperatura (°C)	Humedad Relativa(%)
Ba Cl ₂ 2H ₂ O (Cloruro de bario)		
	29,4	88
Ca Cl ₂ (Cloruro de calcio)	-6,7	44
	0	41
	10	40
	21	35
Ca Cl ₂ .6 H ₂ O (Cloruro de calcio)	5	39,8
	20	32,3
	24	31,0
Ca SO ₄ . 5H ₂ O (Sulfato de calcio)		
	20	98
Ca (NO ₃) ₂ (Nitrato de calcio)	-6,7	64
	0	64

	10	59
	21	55
Ca (NO ₃) ₂ . 4 H ₂ O (Nitrato de calmo)	20	53,6
	25	50,4
	30	46,6
	35	42
	37,8	38,9
K NO ₂ (Nitrito de potasio)	20	49,0
	25	48,2
	30	47,2
	37,8	45,9
K NO ₃ (Nitrato de potasio)	0	97,6
	10	95,5
	20	93,2
	30	90,7
	40	87,9
	50	85,9
K ₂ CO ₃ (Carbonato de potasio)	20	43,9
	25	43,8
	30	43,6
	37,8	43,4

K ₂ Cr O ₄ (Cromato de potasio)	20	86,6
	25	86,5
	30	86,3
	37,8	85,6
K ₂ SO ₄ (Sulfato de potasio)	0	99,1
	10	97,9
	20	97,2
	30	96,6
	40	96,2
	50	95,8
K Br (Bromuro de potasio)	20	84,0
	100	69.2
K ₂ CO ₃ . 2H ₂ O (Carbonato de potasio)	18,9	44
	24,4	43
KCNS (Tiocinato de potasio)	20	47,6
	25	45,7
	30	43,8
	37,8	41,1
K C ₂ H ₃ O ₂ (Acetato de potasio)	20	23,2
	25	22,7
	30	22,0

Li Cl. H ₂ O (Cloruro de litio)	37,8	20,4
	0	14,7
	20	12,4
	30	11,8
	40	11,6
Li Cl (Cloruro de litio)	50	11,4
	20	11,2
	25	11,2
	30	11,2
Mg Cl ₂ (Cloruro de magnesio)	37,8	11,2
	22,8	32,9
	30	32,4
Mg Cl ₂ . 6 H ₂ O (Cloruro de magnesio)	37,8	31,9
	0	35,0
	20	33,6
	30	32,8
	40	32,1
Mg (NO ₃) ₂ (Nitrato de magnesio)	50	31,4
	22,8	53,5
	30	51,4
Mg (NO ₃) ₂ . 6H ₂ O (Nitrato de magnesio)	37,8	49,0
	0	60,6
	20	54,9

	30	52,0
	40	49,2
	50	46,3
Na Br (Bromuro de sodio)	20	59,2
	25	57,8
	30	56,3
	37,8	53,7
Na Cl (Cloruro de sodio)	0	74,9
	20	75,5
	30	75,6
	40	75,4
	50	74,5
Na ₂ C ₂ H ₃ O ₂ (Acetato de sodio)	22,8	74,8
	30	71,4
	37,8	67,7
Na ₂ C ₂ H ₃ O ₂ . 3 H ₂ O (Acetato de sodio)	20	76
	25	73,7
	30	71,3
	37,8	67,6
NaNO ₂ (Nitrito de sodio)	20	65,3
	25	64,3

	30	63,3
	37,8	61,8
Na ₂ Cr ₂ O ₇ (Dicromato de sodio)	22,8	54,1
	30	52,0
	37,8	50,0
Na ₂ Cr ₂ O ₇ . 2H ₂ O (Dicromato de sodio)	0	60,6
	20	55,2
	30	52,5
	40	49,8
	50	46,3
NH ₄ Cl (Cloruro de amonio)	-6,7	82
	0	83
	10	81
	21,1	75
NH ₄ H ₂ PO ₄ (Monofosfato de amonio)	20	93,2
	25	92,6
	30	92,0
	37,8	91,1
	83,7	
NH ₄ SO ₄ (Sulfato de amonio)	0	83,7
	20	80,6
	30	80,0

	40	79,6
	50	79,1

Fuente: HALL (1980)

[continued](#)

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

Cuadro 13 Humedades relativas mantenidas con soluciones de ácidos en diversas concentraciones, a distintas temperaturas

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

Acido	Temperatura °C	Concentración de Acido (% en peso)			
		20	40	60	80
H ₂ SO ₄ (Sulfúrico)	-17,8	87,3	55,7	15	3,14
	10	87,4	56,6	15,8	3,88
	20	87,7	56,7	16,3	4,76
	30	87,5	56,6	17,0	5,75
	40	87,6	57,5	17,8	6,88

	44	88,8	58,2	18,8	8,2
Concentración de Acido (% en peso)					
H NO₃ (Nitríco)		20	30	40	50
	-17,8	89,2	78,4	65,3	45,7
	10	86,7	77	63	45,6
	20	86,6	75,2	61,5	-
	30	86,6	74,9	61,3	-
	40	85,9	74,1	60,5	-
	44	86,5	74,6	-	-
	60	86,9	75,6	-	-
Concentración de Acido (% en peso)					
H Cl (Clorhídrico)		10	20	30	40
	-17,8	83,5	56	27,4	8,9
	10	83,5	-	-	-
	20	83,2	-	-	-
	30	84,2	-	-	-

Fuente: HALL (1980)

Con la aparición de los modelos matemáticos de secado, la determinación de una ecuación para la entalpía de vaporización del agua de los granos creció en importancia, ya que se trata de una de las propiedades del producto que se usa en los modelos existentes.

Las isotermas de sorción del agua de los productos biológicos proporcionan los datos necesarios para calcular la

entalpía de vaporización. La entalpía de vaporización del agua de un producto determinado depende, sobre todo, de la temperatura y del contenido de humedad que presenta dicho producto. Cuanto mayor sea el contenido de humedad, menor será la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua contenida en un producto, y vice versa.

OTHMER (1940) elaboró una metodología general para obtener datos de entalpía de vaporización de una sustancia, basada en la ecuación de Clausius-Clapeyron que aparece a continuación:

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{L_v}{(L_v - V_1)T}$$

ec.31

Como el volumen específico de la fase líquida V' es despreciable, comparado con el de la fase de vapor, se considera la ecuación 31 en la forma:

$$dP_v / dT = L_v / V_v T$$

ec.32

Suponiendo que el vapor de agua se comporta como un gas perfecto, el volumen específico de la fase de vapor, V_v , se puede obtener a partir de la ecuación de los gases perfectos. Así:

$$V_v = R_v T / P_v$$

ec.33

y la ecuación 34 será

$$\frac{1}{L_V} \frac{dP_V}{P_V} = \frac{dT}{T^2 R_V}$$

ec.34

La ecuación 34 se puede aplicar a cualquier sustancia cuyo comportamiento concuerde con las suposiciones que se hacen en las ecuaciones 31 y 33.

Así, si se escribe la ecuación 34 para agua libre y para agua contenida en un producto biológico, a la misma temperatura T, se tiene:

$$\frac{1}{L_V} \frac{dP_V}{P_V} = \frac{1}{L'_V} \cdot \frac{dP_{VS}}{P_{VS}}$$

ec.35

puesto que el segundo miembro de la ecuación 34 es igual tanto para el agua libre como para el agua contenida en el producto biológico. En la ecuación 35. L'_V , L_V , P_{VS} y P_V representan la entalpía de vaporización del agua libre, la entalpía de vaporización del agua del producto biológico, la presión de vapor del agua libre y la presión de vapor del agua correspondiente a la humedad del producto biológico, respectivamente. Integrando la ecuación 35 se tiene:

$$\ln P_V = \frac{L_V}{L'} \ln P_{VS} + f_1$$

ec.36

Las isotermas de sorción de agua de granos están representadas por ecuaciones del tipo:

$$H_e = H_e(T, \phi). \text{ ec.37 o bien}$$

$$\phi = \phi(T, H_e),$$

ec.38

como las ecuaciones 27, 28, 29 y 30.

Así, a partir de las isoterms de sorción, fijando un valor a la humedad del producto, se determina el valor de humedad relativa de equilibrio ϕ a diferentes temperaturas T , y en seguida se calculan los valores de la presión de vapor P_V por la relación:

$$P_V = \phi P_{VS}$$

ec.39

Los valores de presión de vapor de agua saturado P_{VS} se obtienen en tablas de las temperaturas correspondientes. Reemplazando los valores de P_V Y P_{VS} en la ecuación 36 se obtiene el valor de L_V/L'_V , que es la inclinación de la recta de un gráfico bilogarítmico de P_V en función de P_{VS} . Aplicando el mismo procedimiento a otros contenidos de humedad, en la misma gama de temperaturas, se determinan los valores de L_V/L'_V para los contenidos de humedad correspondientes.

De este modo, si se desea determinar la entalpía de vaporización de humedad del agua del arroz en cáscara, a temperaturas en la gama de 15 a 60 °C. y con contenidos de humedad en la gama de 0,15 a 0,25, base seca, se puede utilizar la ecuación de Chung-Pfost, ecuación 30, cuyos parámetros constan en el Cuadro 11:

$$\phi = \exp\left[\frac{594,61}{T - 237,46} \exp(-921732H_e)\right]$$

ec.40

El Cuadro 14 se preparó sobre la base de la metodología descrita, empleando la ecuación 40.

A partir del Cuadro 14, construyendo gráficos bilogarítmicos de P_v en función de PVS, se tienen las siguientes relaciones entre L_v y L'_v . según se ve en el Cuadro 15.

Rodriguez Arias presentó una ecuación para la entalpía de vaporización del agua de maíz, con la siguiente expresión: (Brooker et al, 1984):

Cuadro 14 Presión de vapor de agua en la saturación PVS, en el rango de 15 °C a 60 °C y presión de vapor de agua P_v correspondiente a la humedad del arroz en el rango de 0,15 a 0,25, base seca, en el mismo rango de temperatura

Cuadro 15 Relaciones entre L_v y L'_v

Humedad (base seca)	Relación L_v/L'_v
15	1,08453
17	1,05431
19	1,03496
21	1,02275
23	1,01405
25	1,01006

$L_v / L'_v - 1 = a \exp (-bH)$,
ec.41

en que $a = 4,35$ y $b = 28,25$. Los valores de L_v/L'_v se obtuvieron mediante el procedimiento ya descrito, y los

coeficientes a y b se estimaron por análisis de regresión. La entalpía de vaporización del agua libre está representada por la expresión:

$$L'v = 3,11 \times 10^6 - 2,38 \times 10^3 T$$

ec.42

Aplicando la metodología presentada por OTHMER (1940) para obtener la entalpía de vaporización de otros productos, se obtienen los coeficientes a y b de la ecuación 41, que aparecen en el Cuadro 16.

Cuadro 16 Parámetros a y b de la ecuación 41 respecto de diversos productos

Producto	a	b
Arroz en cáscara	2,1274	21,6100
Soja	0,3240	13,9170
Cebada	0,8627	19,8890
Sorgo	1,0452	19,6440
Trigo (hard)	1,3069	17,6090
Frejol	0,4542	15,9750

Otro método para obtener la entalpía de vaporización del agua de productos biológicos es citado por FORTES (1978). Según este método, la entalpía de condensación o de adsorción de agua en alimentos y granos, L_c , se compone de dos partes: la entalpía que se libera cuando el agua se condensa del vapor saturado en estado de agua libre, L_o , y la entalpía diferencial de adsorción, LW . En física, la entalpía diferencial de adsorción corresponde a la entalpía excesiva del valor de estado libre, que se libera cuando las moléculas de agua son atraídas por fuerzas físicas y químicas. Así:

$$L_c = L_o + \frac{\partial q}{\partial m^T} = L_o + L_w$$

ec.43

o bien

$$L_w = L_c - L_o$$

ec.44

La ecuación de Clausius-Clapeyron, ecuación 34, se puede escribir en la forma:

$$L = RVT^2 \frac{d(\ln P_v)}{dT}$$

ec.45

Las Ecuaciones 43 y 45 conducen a:

$$L_w = R_v T^2 \frac{\partial \ln \sqrt{P_{vs}}}{\partial T}$$

ec.46

$$L_w = R_v T^2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial T} \right)$$

ec.47

Así, en el caso del secado, la entalpía de vaporización del agua al interior del cuerpo se puede expresar como

sigue:

$$L_V = L_o + \frac{R_V T^2}{\phi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial T} \right)$$

ec.48

La ecuación 48 ofrece una alternativa al método que propone OTHMER (1940) o las expresiones empíricas que aparecen en la literatura. Para aplicar las ecuaciones 47 y 48 hay que conocer la ecuación de las isotermas de sorción del producto, las ecuaciones 27 a 30, y el L_o se puede calcular por la ecuación 42.

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

4. Lista de símbolos

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

PSICROMETRIA

SIMBOLOS	DIMENSION	UNIDAD
a_1	Constante psicrométrica	$^{\circ}C (-1)$,
$b_1 \dots b_8$	Constantes	Adimensional
$c_1 \dots c_4$	Constantes	Adimensional

P	Presión barométrica (presión total del aire húmedo)	N/m ²
PV	Presión parcial del vapor de agua	N/m ²
PVS	Presión	
PVS,bh	Presión parcial del vapor de agua en la saturación a temperatura de bulbo húmedo (Tbh)	N/m ²
T	Temperatura de bulbo seco	K
Tbh	Temperatura psicrométrica de bulbo húmedo	K
T*	Temperatura termodinámica de bulbo húmedo	K
Tpr	Temperatura de punto de rocío	K
Vl	Volumen específico del aire húmedo	m ³ /kg
W	Razón de humedad del aire húmedo (razón de la mezcla)	kg/kg
Ws	Razón de humedad del aire húmedo en la saturación	kg/kg
exp	Exponente, base de los logaritmos neperianos	J/kg
h	Entalpía del aire húmedo	
	Entalpía de vaporización del	J/kg

k_{lg}	agua en la saturación	
h_{sg}	Entalpía de sublimación del hielo en la saturación	J/kg
h'_{lg}	Entalpía de vaporización del agua a temperatura de punto de rocío (T_{pr})	J/kg
h'_{sg}	Entalpía de sublimación del hielo a temperaturas de punto de rocío (T_{pr})	J/kg
h''_{lg}	Entalpía de vaporización del agua a temperatura de bulbo Húmedo (T_{bh})	J/g
h''_{sg}	Entalpía de sublimación del hielo a temperatura de bulbo Húmedo (T_{bh})	J/g
\ln	Logaritmo natural	
ϕ	Humedad relativa del aire (decimal o porcentaje)	Adimensional
μ	Grado de saturación (decimal o porcentaje)	Adimensional

HIGROSCOPIA

SIMBOLO	DIMENSION	UNIDAD
A_w	Actividad de agua	Adimensional

c	Constante	Adimensional
d	Constante	Adimensional
f	Constante	Adimensional
k	Constante	Adimensional
L	Entalpía específica	J/kg
Lo	Entalpía del agua libre	J/kg
Lc	Entalpía de condensación o de adsorción	J/kg
Lv	Entalpía de vaporización del agua del grano	J/kg
L'v	Entalpía de vaporización del agua libre	J/kg
Lw	Entalpía diferencial específica de sorción	J/kg
m _s	Masa de materia seca	Kg
m _t	Masa total	Kg
m _w	Masa de agua	Kg
n	Constante	Adimensional
Pv	Presión de vapor de agua	N/m ²
Pvg	Presión de vapor de agua del grano	N/m ²
PvS	Presión de vapor de agua en saturación	N/m ²

R	Constante universal de los gases	$\text{J/kg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Rv	Constante especifica del vapor de agua	$\text{J/kg}\cdot\text{K}^{-1}$
r	Radio del capilar	mm
T	Temperatura absoluta	K
He	Contenido de humedad del grano en equilibrio higroscópico	kg/kg
Hbs	Contenido de humedad del grano, base seca	kg/kg
IHbh	Contenido de humedad del grano, base húmeda	kg/kg
H ₁	Contenido de humedad	
V _l	Volumen especifico de la fase liquida	m^3/kg
V _v	Volumen especifico de la fase de vapor	m^3/kg
α	Angula de contacto	Grados
τ	Tensi ^{ón} superficial	$\text{m}\cdot\text{kg}/\text{m}^2$
ϕ	Humedad relativa del aire, decimal o porcentaje	adimensional
ρ_l	Masa especifica de la fase liquida	kg/m^3

5. Referencias bibliográficas

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

PSICROMETRIA

1. ASAE, ASAE D271.2. Psychrometric Data. Agricultural Engineers Yearbook. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan, 1980.
2. ASHRAE, Handbook of fundamental properties, chapter 5, psychrometrics. *American Society Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers*. New York, 1977.
3. BARWICK, A.J.; JORDAN, KA. & LONGHOUSE, A.D. Accuracy in computer evaluation of moist air properties. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 579-585, 1976.
4. BROCHU, J. & WILLIAMS, G.D.V. Vapor pressure deficit vs. relative humidity for expressing atmospheric moisture content. *Naturaliste Can.*, 96, 621636, 1969.
5. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. *Drying cereal grains*. Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, 1974.
6. BROOKER, D.B. Mathematical model of the psychrometric chart. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 558-560, 1967.
7. CHAU, K.V. Some new empirical equations for properties of moist air. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 23(5): 1266-1271, 1980.

8. DEL GIUDICE, P.M. *Curso Intensivo de Armazenamento de Graos*. Viçosa, Minas Gerais, Imprensa Universitaria, 1969.
9. HAZEN, T.E.; CURRY, N.H. Psychrometry In agricultural engineering. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 11 (2): 180-184, 1968.
10. DOOREMBOS, J. *Agro-meteorological field stations - Irrigation and drainage* paper no. 27. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976.
11. HALASZ, L *Capitulos da tecnica de refrigeraçao*. Campinas, Sao Paulo, Fundaçao Tropical de Pesquisas e Tecnologia, 1980.
12. HENDERSON, S.M. & PERRY, R.L *Agricultural process engineering*. Westport, Connecticut, The AVI Publishing Company, 1979.
13. PALMATIER, E.P. The psychrometric chart and its application. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 11(2): 181-184, 1968.
14. LEE, J.F. & SEARS, F.W. *Termodinamica*, Sao Paulo, Editora Universidade de Sao Paulo, 1969.
15. SILVA, J.S. & COELHO, D.T. *Noções de Climatologia*, Viçosa, Minas Gerais, CENTREINAR, 1979.
16. SILVA, M.B. *Termodinamica*. Sao Paulo, Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda., 1972.
17. THRELKELD, J.L. *Thermal environmental engineering*. New Jersey, PrenticeHALL, 1962.
18. NOVA, N.A.V.; OMETO, J.C. & SALATI, E. *Aspectos termodinamicos da atmosfera*. Piracicaba, Sao Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1972.

19. VAN WYLEM, G.J. & SONTAG, R.E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. Sao Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 1976.

20. WILHEM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 19(2): 318-325,1976.

21. WEISS, A. Algorithms for the calculation of moist air properties on a hand calculator. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 20(6): 1133-1136,1977.

HIGROSCOPIA

1. ALAM, A. & SHOVE, G.G. Higroscopicity and thermal properties of soybeans. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 16(14): 707-709, 1983.

2. ASAE. *Agricultural/ Engineering Yearbook*. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, 1984-1985.

3. BACH, D.B. *Curvas de equilíbrio higroscópico de feijão-preto*. Viçosa, Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 60 p. (Tese M.S.).

4. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, T.W.; HALL, C.W. *Drying cereal/ grains*. Westport, Connecticut, the AVI Publishing Company, 1974. 265 p.

5. CHUNG, D.S. & PFOST, H.B. Adsorption and desorption isotherms for wheat. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 149-157,1967.

6. CHUNG, D. S. & PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. Part I: Heat and free energy changes of adsorption and desorption. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 549-551,1967.

7. CHUNG, D.S. & PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Part II: Development of the general isotherm equation. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 552-555, 1967.
8. CHUNG, D.S. & PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Part III hypothesis, A hypothesis for explaining the hysteresis effect. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(4): 556-557, 1967.
9. DAY, D.L. & NELSON, G.L. Desorption isotherms for wheat. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 8(2): 293-297, 1965.
10. DUGGAL, A.K.; MUIR, W.E.; BROOKER, D.B. Sorption equilibrium moisture contents of wheat kernels and chaff. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan, 1980 (Paper no. 80-3537).
11. FIOREZE, R. *Adequação do modelo de Thompson para simulação de secagem de raspas de mandioca (Manihot esculenta sp.)*. Joao Pessoa, Universidade Federal da Paraíba, 1982. 95 p. (Tese M.S.).
12. FLOOD, C.A. & WHITE, G.M. Desorption equilibrium moisture content relationships for popcorn. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 1(2): 561-565, 571, 1984.
13. FORTES, M. *A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous - media with special reference to drying of grains and foods*. West Lafayette, Ind., Purdue University, 1978, 226 p. (Ph.D. Thesis).
14. FORTES, M. & OKOS, M.R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grains. In: *Advances in drying*. A.A. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 301 p.
15. HALL, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Westport, Connecticut, the AVI Publishing Company, 1980. 382 p.

16. HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, Michigan, **33(1): 29-32,1952.**
17. HENDERSON, S.M. Equilibrium moisture content of small grain hysteresis. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, **13(6) 762-764,1970.**
18. HUNT, W.H. & PIXTON, J.W. Moisture its significance, behavior and measurement. In: *Storage of cereal/ grain and their products*. St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemists, 1974. 549 p.
19. IGBEKA, J.C.; BLAISDELL, J.L.; HERUM, F.L.; HAMDY, M.Y. Equilibrium moisture content of cassava and potato. *American Society of Agricultural Engineers*. St. Joseph, Michigan, 1975 (Papar no. 75-6527).
20. NGODDY, P.O. & BAKKER-ARKEMA, F.W. A generalized theory of sorption phenomena In biological materials. Part II: Adsorption compression on sorbing biological materials. A density functions for sorbed water. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, **15(16): 1153-1159, 1972.**
21. NGODDY, P.O. & BAKKER-ARKEMA, F.W. A generalizad theory of sorption phenomena in biological products, Part III: A pare size distribution function of the power law type for biological materials. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, **15(5): 1160-1164,1972.**
22. OTHMER, D.F. Correlating vapor pressure and latent heat data. *Ind. Eng. Chem.*, **32 841-846, 1940.**
23. PEREIRA, J.A.M. *Estado de secagem e avaliaçao de propriedades físicas da mandioca*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, **1 983.52 p.** (Tese M.S.).
24. RAO, V.G. & PFOST, H.B. Physical properties relatad to drying 20 food grains. *American Society of Agricultural Engineers*. St. Joseph, Michigan, 1980 (Papar no. 80-3539).
25. SILVA, J.N. *Curvas de equilibrio higroscópico de cacau*. Viçosa, Minas Gerais, Universidade Federal de

Viñosa, 1979. 47 p. (Tese M.S.).

26. STROHMAN, R.D. & YOERGER, R.R. A new equilibrium moisture content equations. *Transactions of the ASAE*. St. Joseph, Michigan, 10(5): 675-677, 1967.

27. THOMPSON, H.J. & SHEDD, C.K. Equilibrium moisture content and heat of vaporization of shelled corn and wheat. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, Michigan, 135(11): 786-788, 1954.

28. WHITE, G.M.; ROSS, I.J.; KLAIBER, J.D. Moisture equilibrium in mixing of shelled corn,. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 15(3): 508-509, 514, 1972.

29. YOUNG, J.H. & NELSON, G.L Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(2): 260-262, 1967.

30. YOUNG, J.H. Evaluation of models to describe sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of virgina - type peanuts. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 19(1): 146-155, 1976.

31. YOUNG, J.H. & NELSON, G.L. Research of hysteresis between sorption and desorption isotherms of wheat. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 10(6): 756-761, 1967.

32. ZURITZ, C.; SINGH, R.P.; MOINI, S.M.; HENDERSON, S.M. Desorptions isotherms of rough rice from 10°C to 40°C. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, 22(2): 433-436, 440, 1979.

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

6. Apéndice

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Cuadro 1A Presión de vapor de agua saturado \(mm Hg.\), para presión atmosférica de 760 mm Hg](#)

[Continuación de la cuadro anterior.](#)

[Cuadro 2A Presión de vapor de agua saturado \(mbar\), para presión atmosférica de 1013 mbar](#)

[Continuación de la cuadro anterior.](#)

[Cuadro 3A Presión barométrica \(mbar\) a diferentes alturas](#)

[FIGURA 10 GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 101,325 kPa, ALTITUD: 0 m.](#)

[FIGURA 2a. GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 92,600 Kpa, ALTITUD: 750m.](#)

[FIGURA 3a. GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 84,600 Kpa, ALTITUD 1500m](#)

[FIGURA 4a. GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 77, 1 00 Kpa, ALTITUD: 2250m.](#)

[FIGURA 5a. GRAFICO PSICROMETRICO, TEMPERATURAS NORMALES, PRESION ATMOSFERICA 70,100 Kpa, ALTITUD: 3000m.](#)

[Indice](#) - [◀ Precedente](#) - [Siguiente ▶](#)

[Home](#)":81/cd.iso" "http://www24.brinkster.com/alexweir/"">

7. Sistema internacional de unidades (SI)

[Indice](#) - [◀ Precedente](#)

Unidades Básicas

Longitud	- metros (m)
Masa	- Kilogramos (Kg)
Tiempo	- segundos (s)
Temperatura	- grados (K) (temperatura termodinámica)

Unidades Derivadas

Fuerza	- newton (N)
Trabajo, energía calórica	- Joule (J)
Poder	- watt (W)
Presión	- Pascal (Pa)

Unidades de Conversión (los valores exactos están en negras)

Longitud	
1,0 m	= 100 cm = 1000 mm
	= 1,094 yardas = 39,37 pulgadas
	= 3,2808 pies
1 Pie	= 0,3048 m
1 Pulgada	= 2,54 cm = 25,4 mm
Area	
1m ²	= 10,76 pies ² = 1550,15 pulgadas ²
1 Pie²	= 0,09290304 m²
1 Pulgada²	= 6,4516cm² = 645,16mm²
Volumen	
1m ³	= 1.000 litros
1 Pie ³	= 0,0283168 m ³ = 28,3168 litros
1 U.S. bushel (bu)	= 0,035239 m ³ = 1,244 pies ³
1 British bushel	= 1,032 U.S. bushel
Masa	
1,0 kg	= 1.000 g = 2,2046 lb
1 lb	= 0,45359237 kg
1 metric	= 1 toneiada (Terminología (SI))
1 tonelada corta	= 20 U.S. cwt(hundredweight)

	= 2.000lb = 907,18474 kg = 0,90719 toneladas
1 tonelada larga	= 20 British cwt (hundredweight)
	= 2.240 lb = 1016,046908 kg
	= 1,01605 toneladas
1 cwt (U.S.)	= 100lb
1 cwt	= 112lb
Temperatura	
°C	= °K - 273,15
°K	= °C + 273,15
°C	= (°F-32)/1,8
°F	= (1,8 x °C) + 32
Térmico, Poder, Calor, Energía	
1 J	= 0,239 cal
1 cal	= 4,1868 J
1 thermo -chemical cal	= 4,184 J
1 Kj/Kg	= 0,23884 Kcal/kg = 0,4299 Btu/lb
1 Btu	= 1,0551 Kj = 0,2520 Kcal
1 Kcal	= 3,9683 Btu
1 Kcal/kg	= 1,8 Btu/lb
1 Kcal/kg °C	= 4,1868 Kj/kg °C = 1 Btu/lb °F
1 KW hr	= 3.600 KJ

1W	= 1J/s
	= 0,0569 Btu/min = 3,412 Btu/hr
	= 0,239 cal/s
	= 0,00134 hP
1 Kcal	= 1,163W
1 hP	= 0,745700 KW
1 KW	= 1,3410 hP = 1 Kj/s
1 Btu/hr/Pie2/Pulgada \diamond F	= 0,08333 Btu/hr/Pie2/Pie \diamond F
	= 0,0003444 9. cal/sec cm \diamond C
	= 0,144228 W/m \diamond C
Presi \diamondn	
1 Pa	= 1 N/m \diamond
N	= Kg m/s ²
1mm H₂O	= 9,80665 Pa
	= 1 mm de columna de agua (mm C.A.)
1 atm	= 760 mm H' = 101,325 Kpa
	= 29,92 Pulgadas Hg
1 bar	= 750 Hg
Densidad	
1 lb/Pie ³	= 15,022 Kg/m \diamond
1 Kg/m \diamond	= 0,0624 lb/Pie ³

Caudal

1 cfm/bu	= 0,80356 m ³ /m ³ mio = 48,214 m ³ /m ³ hr
1 cfm/Pie ³	= 1,0 m ³ /m ³ mio
1 Pie ³ /min	= 1,699 m ³ /hr
1 m ³ /m ³ mio	= 1,24446 cfm/bu
1 m ³ /m ³ hr	= 0,020741 cfm/bu
Temperatura normal T y Presión P (NTP)	
T	= 273,15 K = 0 C
P	= 101,325 KPa = 760 mm Hg

[Indice](#) - [Precedente](#)