

ANEXO D. Cálculo de pérdidas y cargas de vapor de agua

El vapor de agua puede fluir a través de las estructuras originando una perturbación, pérdida o ganancia (carga), al sistema de control de humedad. Esta perturbación debe ser calculada en aplicaciones en las que se deba mantener el contenido de humedad del aire, como en este proyecto.

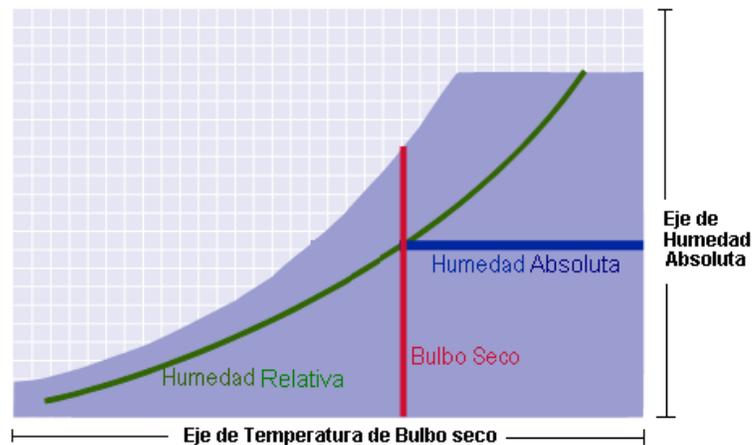
El vapor de agua o calor latente fluye a través de las estructuras siempre que exista una diferencia de la presión de vapor entre el interior y el exterior. El vapor de agua fluye de un espacio de alta presión a uno de baja presión a una velocidad determinada por la permeabilidad de la estructura. Este proceso es análogo al del flujo de calor, salvo que en el flujo de vapor hay transferencia de masa.

Así como el flujo térmico se puede reducir aumentando el aislamiento, el flujo de vapor puede ser reducido por barreras o capas impermeables, que pueden ser de pintura, hoja de aluminio o chapas galvanizadas. Se las debe colocar en el lado de la estructura en que existe la presión más alta, a fin de evitar que el vapor llegue a la barrera y se condense dentro de la pared. El procedimiento para calcular pérdidas y cargas de calor latente es el siguiente:

- **Determinar la diferencia de humedad absoluta entre el interior y el exterior de cada una de las secciones.** Para encontrar los valores de humedad absoluta y determinar esta diferencia se usa el gráfico sicrométrico tomando como datos de entrada la temperatura seca y el valor de humedad relativa. En la figura

D.1 se indica un ejemplo del procedimiento a seguir para determinar los valores de humedad absoluta con los datos de entrada, tanto exteriores como interiores.

Figura D.1 Determinación del valor de humedad absoluta



En el ejemplo, por el punto de intersección entre el valor de temperatura de bulbo seco y la curva de humedad relativa se traza una línea, paralela al eje X, hasta encontrar el valor de humedad absoluta (HA) en el eje Y.

Las humedades absolutas en el exterior se determinan para el cálculo de pérdidas tomando como temperatura de bulbo seco la menor temperatura registrada en Popayán durante los años 2003 y 2004⁴ (8,2 °C, con un valor de humedad relativa de 57%), y, para el cálculo de cargas se toma la temperatura más alta registrada (30,2 °C, con un valor de humedad relativa de 65%). Así, se tiene que los valores de humedad absoluta en el exterior son: de **4** gramos de agua por kg. de aire seco

⁴ Estos valores fueron tomados de: Anuario meteorológico 2003, Comité de Cafeteros Pág. 122. IDEAM, Información de Meteorología Aeronáutica, Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón – Santiago de Cali. Ver tabla B.2.

para el cálculo de pérdidas y de **17,5** gramos de agua por kg. de aire seco para el cálculo de las cargas.

Las humedades absolutas internas se obtienen bajo el mismo procedimiento, tomando como valores de temperatura seca interior los límites de los rangos de control de cada sección con un valor de humedad relativa de 70%. Para la sección climática fría, con rango de temperatura 12 a 19 °C con 70 %HR, se tienen humedades absolutas de **6** y **10** g./Kg. respectivamente. Para la sección templada, con temperaturas entre 19 y 26 °C con 70 %HR, se tienen **10** y **15** g./Kg de humedad absoluta. Para la sección climática cálida, se tienen **15** y **23** g./Kg. de humedad absoluta, para los límites de temperatura de 26 y 33 °C con 70%HR. Para los valores de humedad absoluta de los locales adjuntos, que según sea el caso se asumen como externos, se toman los más bajos para el cálculo de pérdidas y los más altos para el cálculo de cargas.

Las diferencias de humedades absolutas entre el exterior y el interior para cada sección se muestran en la tabla D.1. Los datos están en gramos de agua por kilogramos de aire seco.

Tabla D.1 Diferencia de humedades absolutas (Ext - Int) para cada sección
a) Para cálculo de pérdidas por los componentes externos

	T° C seca Interior	%HR Interior	HA Interior	HA Exterior	Diferencia Humedad
Sección 1	12	70%	6	4	-2
	19	70%	10	4	-6
Sección 2	19	70%	10	4	-6
	26	70%	15	4	-11
Sección 3	26	70%	15	4	-11
	33	70%	23	4	-19

b) Para el cálculo de pérdidas por los componentes internos

	T° C seca Interior	%HR Interior	HA Interior	HA local adjunto	Diferencia Humedad
Sección 1 - Sección 2	12	70%	6	10	4
	19	70%	10	10	0
Sección 2 - Sección 1	19	70%	10	6	-4
	26	70%	15	6	-9
Sección 2 - Sección 3	19	70%	10	15	5
	26	70%	15	15	0
Sección 3 - Sección 2	26	70%	15	10	-5
	33	70%	23	10	-13

c) Para el cálculo de cargas por los componentes externos.

	T° C seca Interior	%HR Interior	HA Interior	HA Exterior	Diferencia Humedad
Sección 1	12	70%	6	17,5	11,5
	19	70%	10	17,5	7,5
Sección 2	19	70%	10	17,5	7,5
	26	70%	15	17,5	2,5
Sección 3	26	70%	15	17,5	2,5
	33	70%	23	17,5	-5,5

d) Para el cálculo de cargas por los componentes internos.

	T° C seca Interior	%HR Interior	HA Interior	HA local adjunto	Diferencia Humedad
Sección 1 - Sección 2	12	70%	6	15	9
	19	70%	10	15	5
Sección 2 - Sección 1	19	70%	10	10	0
	26	70%	15	10	-5
Sección 2 - Sección 3	19	70%	10	23	13
	26	70%	15	23	8
Sección 3 - Sección 2	26	70%	15	15	0
	33	70%	23	15	-8

De la tabla D.1 se puede concluir que bajo condiciones críticas de temperatura exterior (8,2°C) se tiene pérdidas hacia el exterior de las tres secciones, ya que existen diferencias negativas de humedades absolutas entre el interior y el

exterior. Se presentarán más pérdidas desde la sección 3 al exterior debido a que, bajo las condiciones evaluadas, la diferencia de temperaturas y, por ende, de humedades absolutas es más alta que en las otras secciones.

Las pérdidas de calor latente hacia los locales adjuntos se presentan de la sección 2 a la 1 y de la sección 3 a la 2, debido a las temperaturas de cada local.

Las máximas cargas de calor latente del ambiente exterior hacia el interior, en condiciones críticas de temperatura ($30,2^{\circ}\text{C}$), se presentan en las tres secciones, con excepción de una condición en la sección 3, cuando la temperatura de la sección es aún mayor que la máxima del exterior, lo que infiere una diferencia de humedades absolutas negativa o pérdida. Las cargas más altas en estas condiciones se presentan para la sección 1 debido a la diferencia de temperaturas y la correspondiente diferencia de humedades absolutas entre esta sección y el exterior.

Ya que se obtienen dos valores de diferencias de humedades absolutas, los cálculos de pérdidas y cargas de calor latente, se realizan con los valores más altos de diferencia de humedades absolutas. Es decir, los cálculos se realizan con la diferencia que produce más pérdidas o cargas, y no, con los dos límites del rango de control.

Por ejemplo, según la tabla D.1a para el cálculo de pérdidas en la sección 1 se establecen dos diferencias de humedad de -2 y -6, entonces para calcular las máximas pérdidas por los componentes externos de la sección 1, se toma un valor de diferencia de temperatura de -6. Para el cálculo de pérdidas hacia un local adjunto, por ejemplo de la sección 3 a la 2, se toma el valor más alto de humedad absoluta en el interior de la sección 3, es decir, 23 g./kg. y el valor más bajo de

humedad absoluta en la sección 2, es decir, 10g./kg., lo que resulta en una diferencia (ext - int) de -13 g./kg., según la tabla D.1b.

Según la tabla D.1c para el cálculo de cargas en la sección 1 se establecen igualmente dos diferencias de humedad de 11,5 y 7,5 g./kg., entonces un máximo de carga en esta sección se calcula evaluando la diferencia de humedad absoluta más alta, es decir 11,5. Para el cálculo de cargas hacia un local adjunto, por ejemplo de la sección 1 a la 2, se toma el valor más bajo de humedad absoluta en el interior de la sección 1, es decir, 6 g./kg. y el valor más alto de humedad absoluta en la sección 2, es decir, 15 g./kg., lo que resulta en una diferencia (ext - int) de 9 g./kg., valor con el cual se obtiene el valor más alto de cargas del exterior en la sección 1.

Para las paredes internas adjuntas al corredor se toma los valores de humedad absoluta del exterior, suponiendo el peor de los casos, en que el corredor no funcione como cámara de aire. Es decir, que para el cálculo de pérdidas y cargas por las paredes interiores 3.2, 2.2 y 1.2 (Ver figura B.2) se toman los valores de humedad relativa exterior. Para el cálculo de pérdidas un valor de humedad absoluta exterior de 4,0 g./kg. y para las cargas 17,5 g./kg..

- **Determinar la cantidad de calor latente correspondiente a una diferencia de humedad absoluta entre el exterior y el interior de 1g de agua /1 kg de aire seco.** Este valor se determina de acuerdo al material de construcción y el área de cada uno de los componentes de las secciones.

Los datos de calor latente se toman de la Tabla 1.40, en el texto “Tratado de Refrigeración y Aire Acondicionado” de Carrier Air Conditioning Company, correspondientes a una diferencia de humedad absoluta entre el exterior y el interior de 1g de agua /1 kg de aire seco por m² para los materiales que más se asemejan a los establecidos en el diseño del laboratorio.

Los materiales seleccionados de la bibliografía de referencia, se establecieron con la ayuda de un Ingeniero Civil de forma que sus características concordaran con las de los materiales propuestos para la construcción del laboratorio. El panel yeso es un material relativamente nuevo y no figuran sus datos específicos de calor latente. De acuerdo a lo anterior, para las paredes de “hormigón de 15 cm. con dos capas de pintura impermeable” se establece un valor de calor latente de $3,33 \times 10^{-3}$ kcal/h por cada g./kg. de diferencia. Para los techos (cubierta y cielo raso) de “hormigón de 5cm + 3 capas de fieltro, con dos capas de pintura impermeable” se establece un valor de calor latente de $9,25 \times 10^{-3}$ kcal/h por cada g./kg. de diferencia.

Los anteriores valores de calor latente están determinados para 1m², por lo tanto, como primera medida debe multiplicarse el área de transferencia por el valor de calor latente, para obtener un valor total sobre el componente⁵. En la tabla D.2 se muestran los resultados de esta operación.

⁵ Aquí se hace uso de las etiquetas impuestas para los componentes en el Anexo B (figura B.2).

Tabla D.2 Calor latente por g./kg. de diferencia de humedad absoluta por el área de los componentes de cada sección

Componentes Ext.	A (m ²)	Ganancias Latentes (Kcal / h * m ²)	Total (Kcal/h)
Sección 1 - Clima Frío			
Pared exterior 1.1	13,875	0,00925	0,13
Pared exterior 1.2	23,7	0,00925	0,22
Cubierta 1	52,614	0,00333	0,18
Pared interior 1.1	13,875	0,00925	0,13
Pared interior 1.2	21,2	0,00925	0,20
Sección 2 - Clima Templado			
Pared exterior 2.1	13,875	0,00925	0,13
Cubierta 2	52,614	0,00333	0,18
Pared interior 2.1	13,875	0,00925	0,13
Pared interior 2.3	13,875	0,00925	0,13
Pared interior 2.2	21,2	0,00925	0,20
Sección 3 - Clima Cálido			
Pared exterior 3.1	13,875	0,00925	0,13
Pared exterior 3.2	23,7	0,00925	0,22
Cubierta 3	52,614	0,00333	0,18
Pared interior 3.1	13,875	0,00925	0,13
Pared interior 3.2	21,2	0,00925	0,20

- **Determinar las pérdidas y cargas de calor latente totales.** El calor latente total se obtiene bajo la siguiente fórmula:

$$Q_L = Q_{(1g/kg\ m^2)} * A * (HA_{ext} - HA_{int})$$

Donde:

- Q_L = Calor Latente total, (Kcal/h)
- Q_(1g./kg. m²) = Calor Latente, (kcal/h) por 1g./kg. por m² de diferencia de HA
- A = Área de transferencia de calor, (m²)
- (HA_{ext} – HA_{int}) = Diferencia de HA entre el interior y el exterior (g./kg.)

Los valores de “ $Q_{(1g./kg. \text{ m}^2)} \times A$ ” se obtuvieron en la tabla D.2. Los valores de “ $HA_{\text{ext}}-HA_{\text{int}}$ ” se toman de la tabla D.1, según las consideraciones explicadas en el respectivo ítem. Los resultados de pérdidas de calor latente por cada uno de los componentes y el total de pérdidas en cada una de las secciones se muestran en la tabla D.3.

Tabla D.3 Pérdidas de calor latente en condiciones críticas

	Calor Latente por 1 g./kg.	Diferencia de Humedades Absolutas	Total pérdidas de calor latente (Kcal/h)
Sección 1 - Clima frío			
Pared exterior 1.1	0,13	-6	-0,770
Pared exterior 1.2	0,22	-6	-1,315
Cubierta 1	0,18	-6	-1,051
Pared interior 1.1	0,13	No pérdida	No pérdida
Pared interior 1.2	0,20	-6	-1,18
Total			-4,313
Sección 2 - Clima templado			
Pared exterior 2.1	0,13	-11	-1,412
Cubierta 2	0,18	-11	-1,927
Pared interior 2.1	0,13	-9	-1,155
Pared interior 2.3	0,13	No pérdida	No pérdida
Pared interior 2.2	0,20	-11	-2,157
Total			-6,651
Sección 3 - Clima cálido			
Pared exterior 3.1	0,13	-19	-2,439
Pared exterior 3.2	0,22	-19	-4,165
Cubierta 3	0,18	-19	-3,329
Pared interior 3.1	0,13	-13	-1,668
Pared interior 3.2	0,20	-19	-3,726
Total			-15,327

Los resultados de cargas de calor latente se presentan en la tabla D.4

Tabla D.4 Cargas de calor latente en condiciones críticas

	Calor Latente por 1 g./kg.	Diferencia de Humedades Absolutas	Total cargas de calor latente (kcal/h)
Sección 1 - Clima frío			
Pared exterior 1.1	0,13	11,5	1,476
Pared exterior 1.2	0,22	11,5	2,521
Cubierta 1	0,18	11,5	2,015
Pared interior 1.1	0,13	9	1,155
Pared interior 1.2	0,20	11,5	2,26
Total			9,427
Sección 2 - Clima templado			
Pared exterior 2.1	0,13	7,5	0,963
Cubierta 2	0,18	7,5	1,314
Pared interior 2.1	0,13	No carga	No carga
Pared interior 2.3	0,13	13	1,668
Pared interior 2.2	0,20	7,5	1,471
Total			5,416
Sección 3 - Clima cálido			
Pared exterior 3.1	0,13	2,5	0,321
Pared exterior 3.2	0,22	2,5	0,548
Cubierta 3	0,18	2,5	0,438
Pared interior 3.1	0,13	No carga	No carga
Pared interior 3.2	0,20	2,5	0,490
Total			1,797

Se puede concluir que los valores de pérdidas y cargas de vapor de agua como perturbación al sistema pueden considerarse casi despreciables debido a la impermeabilización proyectada para las paredes y techo. Por otra parte, se considera que la principal perturbación al sistema de control de humedad será el comportamiento higroscópico de los cultivos; esta perturbación debe ser tenida en cuenta aunque es difícil predecir y/o cuantificar su valor ya que las secciones o cuartos de cultivo están diseñados para la experimentación, investigación y producción de cualquier especie vegetal.