

PARTE IV. UNIDAD 3. MODELOS DE BALANCE DE MASA

1- BALANCE DE MASA APLICADO A LOS SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO POR EVAPORACIÓN

En la Figura 1 se presenta un ejemplo de los flujos que determinan el contenido de humedad del aire del invernadero cuando no existe control de la humedad. El vapor de agua que proviene de la transpiración del cultivo y de la evaporación del suelo puede, en parte, condensarse sobre la pared de cubierta y, en parte, disiparse a través de la ventilación y las fugas. Es frecuente que el proceso de ventilación represente una pérdida de vapor de agua debido a que, en general, se mezcla, aire exterior más frío y más seco con aire interior más caliente y más húmedo. Por consiguiente, la variación del contenido de vapor de agua del aire, Δq_a , en un intervalo de tiempo (Δt), depende del equilibrio que se establece entre los aportes de vapor de agua por transpiración y evaporación, y las pérdidas por condensación y por fugas-ventilación.

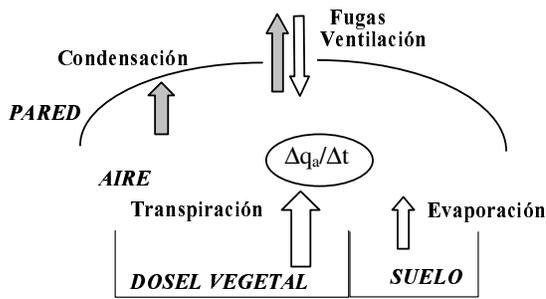


Figura 1. Procesos que intervienen en la variación temporal el contenido de vapor de agua del aire del invernadero, $\Delta q_a/\Delta t$.

1.1- ESTIMACIÓN DE FUENTES Y SUMIDEROS DE VAPOR DE AGUA

Para determinar el contenido de vapor de agua del aire, es preciso conocer el flujo de vapor de agua que se pierde por ventilación y el flujo de transpiración.

A- Flujo de vapor de agua a través de la ventilación

La cantidad de agua que se intercambia por ventilación se puede evaluar con la relación que da la densidad de flujo de vapor de agua, $\Phi_{v,vf}$, en función de un coeficiente de intercambio fugas-ventilación, h_{fv} , y del gradiente entre en contenido de humedad interior y exterior:

$$\Phi_{v,vf} = h_{fv} (q_a - q_o) \tag{1a}$$

donde:

q_a y q_o ($g\ kg^{-1}$) = humedad absoluta interior y exterior, siendo h_{fv} ($kg_{aire}\ m^{-2}\ s^{-1}$) función de la tasa de renovación, Z ($m^3\ m^{-3}\ s^{-1}$):

$$h_{fv} = \frac{V}{S} \rho Z \tag{1b}$$

con:

ρ = densidad del aire (kg m^{-3}), V = volumen del invernadero (m^3), S = superficie de suelo (m^2).

Se puede conocer con una buena precisión la tasa de renovación cuando el invernadero está equipado con sistemas de ventilación mecánica, siendo éste el caso de los sistemas por paneles evaporantes en los que, de forma clásica, la extracción del flujo de aire se hace con ventiladores. Sin embargo, la mayoría de invernaderos están equipados con sistemas de ventilación natural en los que es más difícil evaluar la tasa de renovación del aire debido a que depende de múltiples factores (posición y geometría de las ventanas, volumen y geometría del invernadero, obstáculos tales como el cultivo que frenan el movimiento del aire) y de variables no controlables que actúan de forma simultánea sobre la tasa de renovación (*acción del viento*: dirección, velocidad y turbulencia; *efecto chimenea*: diferencia de temperatura entre el interior y el exterior). Para condiciones de baja velocidad de viento, el efecto chimenea es preponderante, pero no se puede definir con precisión el límite de velocidad del viento que determina qué efecto (eólico o chimenea) es preponderante.

Desde un objetivo práctico, y a efectos de un diseño de los sistemas de climatización, podemos adoptar modelos físicos de estimación de tasa de renovación de edificios que han sido adaptados para el caso de invernaderos (Jolliet, 1991):

$$Z = \frac{A_f}{V} \left(f_u^2 u^2 + f_T^2 (T_a - T_o) \right)^{1/2} \quad (2a)$$

donde:

f_u^2 (= 0,22) y f_T^2 (= $0,16 \text{ m s}^{-1} \text{ K}^{-1/2}$) determinan la influencia relativa del viento y del efecto chimenea, A_f es la superficie efectiva de infiltración (m^2) definida por la relación:

$$A_f = A_c f_f + 0,005884 A_v \theta e^{-\theta/\beta} \quad (2b)$$

siendo:

f_f = factor que determina la estanqueidad del invernadero, varía de $2,5 \cdot 10^{-4}$ para un invernadero muy estanco a $20 \cdot 10^{-4}$ para un invernadero poco estanco y con defectos de estanqueidad aparentes. A_c = superficie del techo (m^2), A_v = superficie que ocupa la ventilación (m^2), θ = ángulo de apertura de la ventilación (grados), β = ángulo máximo de apertura (grados).

Como paso previo para evaluar el orden de magnitud del vapor de agua que se pierde por fugas, es necesario determinar la tasa de renovación del aire (Ecn. 2). A modo de ejemplo, podemos considerar las características del invernadero y de velocidad del viento que se dan en el Cuadro 1:

- En periodo de noche con la ventilación cerrada ($\theta = 0$) y $\Delta T = 6$ °C, la tasa de renovación alcanza, $Z = 0,000317 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ($\equiv 1,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), valor similar al que se da en el Cuadro 5 (Unidad 2) para calcular las pérdidas por fugas.

- En periodo de día, para $\Delta T = 2$ °C y un ángulo de apertura una apertura de 10°, la tasa de renovación alcanza $Z = 0,00296 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$, lo que equivale a $10,7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, siendo $Z = 0,00714 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ para $\theta = 50$ ° lo que equivale a una tasa horaria de $Z = 25,7 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$.

Cuadro 1. Valores de las características del invernadero y de la velocidad del viento, elegidos para evaluar la tasa de renovación Z (Ecn. 2).

Superficie suelo	Volumen invernadero	Superficie techo (m ²)	Superficie ventilación (m ²)	Factor estanqueidad	Ángulo máx. β (°)	u (m s ⁻¹)
S (m ²)	V (m ³)	$A_c = 1,1 S$	$A_v = 0,20 S$	f_f		
1000	3000	1100	200	$10 \cdot 10^{-4}$	60°	3,5

Si consideramos que, en una determinada localidad, las condiciones a medio día son $T_o = 37$ °C, $HR_o = 30$ % y $u = 3 \text{ m s}^{-1}$, la cantidad de agua que se intercambia con la ventilación ($\theta = 50$ °) en un invernadero con una temperatura $T_a = 35$ °C y $HR_a = 50$ % se puede evaluar con la relación (1). Para $\rho = 1,157 \text{ kg m}^{-3}$ y $Z = 0,00714 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$:

$$h_{fv} = (3)(1,157)(0,00714) = 0,02477 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

A partir de los valores de T y de HR en el exterior e interior del invernadero se puede deducir la humedad absoluta (ver lectura complementaria Parte II), siendo en el exterior $q_o = 11,4 \text{ g kg}^{-1}$ y en el interior $q_a = 17,10 \text{ g kg}^{-1}$. La densidad de flujo de vapor de agua que se pierde por ventilación es:

$$\Phi_{v,fv} = 0,02477 (17,10 - 11,40) = 0,1412 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Si consideramos que las condiciones climáticas al interior y al exterior prevalecen durante una hora, se pueden perder, en este caso $0,508 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

B- Flujo de vapor de agua por evapotranspiración

Los aportes de vapor de agua que corresponden a la evapotranspiración estándar del cultivo (ET_c) se pueden calcular a partir de la relación:

$$ET_c = K_c ET_o$$

siendo K_c = coeficiente de cultivo, ET_o la evapotranspiración potencial.

Podemos considerar, en primera aproximación que la fórmula de Penman-Monteith (FAO 1998), establecida a escala diaria para predecir ET_o puede aplicarse a escala horaria, siendo el valor de ET_o a esta escala:

$$ET_o = \frac{\delta R_n / \lambda}{\delta + \gamma(1 + 0,34 u)} + \frac{\gamma(37,5/(T_a + 273)) u D_a}{\delta + \gamma(1 + 0,34 u)} \quad (3)$$

con:

ET_o en $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$

R_n = radiación neta, $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$

λ = calor latente de vaporización = $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$

δ = pendiente de la curva de saturación en kPa K^{-1} $\left(= \frac{4098 e^*_{s}(T_a)}{(T_a + 273)^2} \right)$

γ = constante psicrométrica = $0,066 \text{ kPa K}^{-1}$

D_a = Déficit de saturación del aire en kPa (ver Lectura Complementaria Parte II)

T_a = temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

Para evaluar el orden de magnitud de ET_o , en verano a medio día bajo invernadero, podemos utilizar las condiciones climáticas que se dan el Cuadro 2.

Con los datos del Cuadro 2, el valor horario de ET_o que da Ecn 3 es:

$$ET_o = \frac{(0,243)(1,6)/2,5}{0,243 + 0,066(1 + (0,34)(0,3))} + \frac{0,066(37,5/(35 + 273))(0,3)(2,25)}{0,243 + 0,066(1 + (0,34)(0,3))} = 0,52 \text{ kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$$

Para un cultivo con un coeficiente de $K_c = 0,2$:

$$ET_c = (0,2)(0,52) = 0,104 \text{ kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$$

siendo el flujo por evapotranspiración, en $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $\Phi_{v,sv} = (1000/3600) ET_c$

$$\Phi_{v,vs} = 0,0288 \text{ g m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

Cuadro 2. Condiciones climáticas al interior del invernadero y valores utilizados para evaluar el orden de magnitud de ET_o . G_o representa la radiación global solar exterior y ξ (= 0.7) representa el coeficiente de captación de radiación solar del invernadero.

Radiación solar	Radiación neta R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	T_a	Hum. Relat. HR (%)	Déficit sat. D_a (kPa)	Tens vap. sat $e^*_{s}(T_a)$ (kPa)	δ (kPa K^{-1})	u_a (m s^{-1})
ξG_o ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	$R_n = 0,8 \xi G_o$	($^{\circ}\text{C}$)					
2 (=555,5 W m^{-2})	1,6 (=444,4 W m^{-2})	35	50	2,25	5,62	0,243	0,3

Para un cultivo con un coeficiente de $K_c = 0,6$, los valores de ET_c y $\Phi_{v,vs}$ son:

$$ET_c = (0,6)(0,52) = 0,312 \text{ kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$$

$$\Phi_{v,vs} = 0,0866 \text{ g m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

1.2- APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE NEBULIZACIÓN

La estimación del flujo de nebulización se puede llevar a cabo a partir de un balance de vapor de agua (Unidad 1). Si que no existe condensación en la pared en período de nebulización, la ecuación 4 da el balance de vapor de agua, que se puede establecer respecto a:

- La humedad absoluta del aire interior, q_a , $\text{g}_{\text{vapor de agua}} \text{kg}^{-1}_{\text{aire}}$:

$$\rho \frac{V}{S} \frac{\Delta q_a}{\Delta t} = \Phi_{v,sv} + \Phi_{v,N} \pm \Phi_{v,vf} \quad (4a)$$

con:

$\Delta q_a/\Delta t$ = variación de la humedad absoluta, Δq_a , en el intervalo de tiempo Δt ; Φ = densidad de flujo de vapor de agua ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$): por evapotranspiración, $\Phi_{v,sv}$ ($=\Phi_{vs} + \Phi_{vv}$), por nebulización, $\Phi_{v,N}$, y por ventilación-fugas, $\Phi_{v,vf}$.

- La humedad específica del aire interior, x_a $\text{g}_{\text{vapor de agua}} \text{m}^{-3}_{\text{aire}}$:

$$\frac{V}{S} \frac{\Delta x_a}{\Delta t} = \Phi_{v,sv} + \Phi_{v,N} \pm \Phi_{v,vf} \quad (4b)$$

La Figura 2 muestra un ejemplo de los flujos que intervienen en un invernadero, con control de la humedad (es decir, con aporte de vapor de agua por nebulización o por “fog-system”).

A partir de Ecn. 4, y para condiciones de régimen estacionario ($\Delta q/\Delta t = 0$), $\Phi_{v,N}$ viene dado por:

$$\Phi_{v,N} = -\Phi_{v,sv} \pm \Phi_{v,vf} \quad (5a)$$

sustituyendo $\Phi_{v,vf}$ por Ecn. 1, se obtiene el flujo de nebulización en función de Z:

$$\Phi_{v,N} = -\Phi_{v,sv} \pm \frac{V}{S} \rho Z (q_a - q_o) \quad (5b)$$

La ecuación (5) se puede utilizar para evaluar la tasa de nebulización que hay que aplicar manteniendo una determinada tasa de renovación del aire cuando se conoce la evapotranspiración.

Considerando los valores de $\Phi_{v,fv}$ ($= 0,1412 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y $\Phi_{v,sv}$ ($=0,0866 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $K_c = 0,6$, ($=0,0288 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $K_c = 0,2$), calculados en el Apartado 1.1 para condiciones típicas de medio día en el área del mediterráneo, podemos tener una evaluación de la tasa máxima de nebulización que requiere el invernadero en función del coeficiente de cultivo:

Para un valor de $K_c = 0,2$:

$$\Phi_{v,N} = -0,0288 + 0,1412 = 0,1124 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \equiv 0,405 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Para un valor de $K_c = 0,6$:

$$\Phi_{v,N} = -0,0866 + 0,1412 = 0,0546 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \equiv 0,197 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

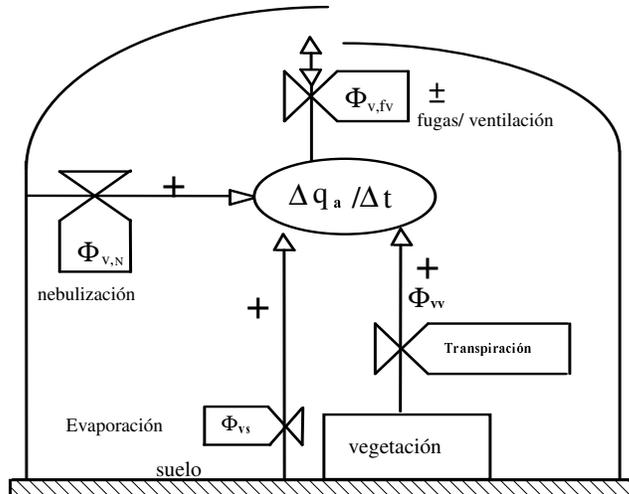


Figura 2. Flujos de vapor de agua que intervienen en un invernadero y que determinan la variación del contenido de humedad del aire Δq_a , en el intervalo de tiempo, Δt . Φ_v representa la densidad de flujo de vapor de agua ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) por transpiración y evaporación (Φ_{vv} , y Φ_{vs} , respectivamente) y por ventilación-fugas y nebulización ($\Phi_{v,fv}$, y $\Phi_{v,N}$, respectivamente).

Puede observarse que el flujo de transpiración contribuye de manera preponderante en el nivel de humedad de aire del invernadero. En este ejemplo concreto, la tasa de nebulización dobla (pasa de $\approx 0,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a $\approx 0,41 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) cuando K_c pasa de 0,6 a $K_c = 0,2$. Si consideramos el caso más desfavorable ($K_c = 0,2$), con una instalación de boquillas nebulizadoras, caudal 6 L h^{-1} , se necesitarían, aproximadamente, 0,07 boquillas por m^2 de suelo.

Las Figuras 3a-b se da un ejemplo, para un día típico de verano del área del mediterráneo (Figura 3a) de la evolución diaria de $\Phi_{v,N}$ (Figura 3b). Este ejemplo muestra que el aporte diario por nebulización depende en parte de la tasa de evapotranspiración y varía de $3,25 \text{ mm día}^{-1}$ ($K_c = 0,6$) a $5,5 \text{ mm día}^{-1}$ (para $K_c = 0,2$).

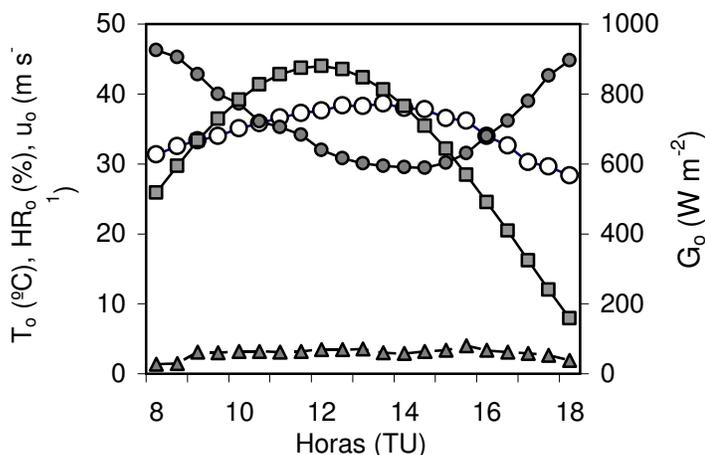


Figura 3a. Valores de las variables climáticas utilizadas para determinar la tasa de nebulización (Ecn. 5) (ver Figura 3b): temperatura del aire (O); humedad relativa (●); velocidad del viento (▲); radiación global solar (■).

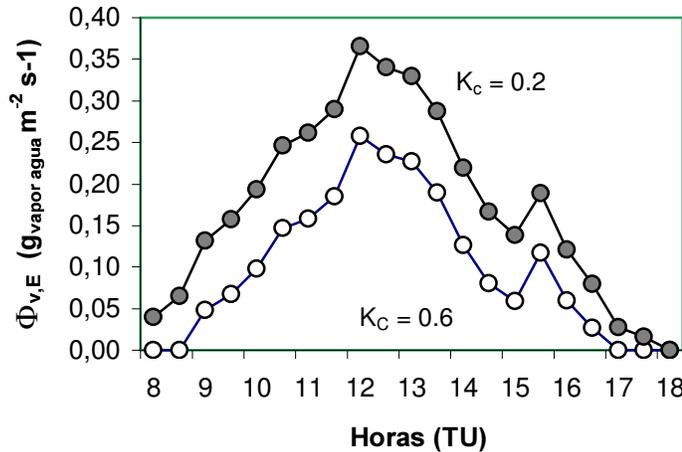


Figura 3b. Evolución de la tasa de nebulización, $\Phi_{v,N}$, para dos valores del coeficiente de cultivo, K_c para un día de verano, utilizando la ecuación 5 y los valores de los datos climáticos que se dan en la Figura 3a.

1.3- APLICACIÓN A LOS PANELES EVAPORANTES

El diseño de un panel evaporante se puede abordar considerando que el paso del aire a través del panel concierne un proceso psicrométrico y que al salir del invernadero el aire ha ganado en contenido de vapor de agua y en temperatura debido a la carga solar que recibe el invernadero que se reparte entre calor sensible y latente. En el esquema de la Figura 4 se presentan los diferentes pasos a tener en cuenta para diseñar un panel evaporante.

- En el estado 1

El estado (1) representa el estado del aire exterior (Temperatura, T_o , y humedad relativa, HR_o) que se ha elegido para dimensionar el caudal máximo que requiere el sistema. Si en una determinada localidad las condiciones extremas más probables son $T_o = 38^\circ\text{C}$ y $HR_1 = 35\%$, se deducen el resto de las variables de estado del aire húmedo 3 (Lectura complementaria Parte II) cuyos valores se detallan en el Cuadro 3.

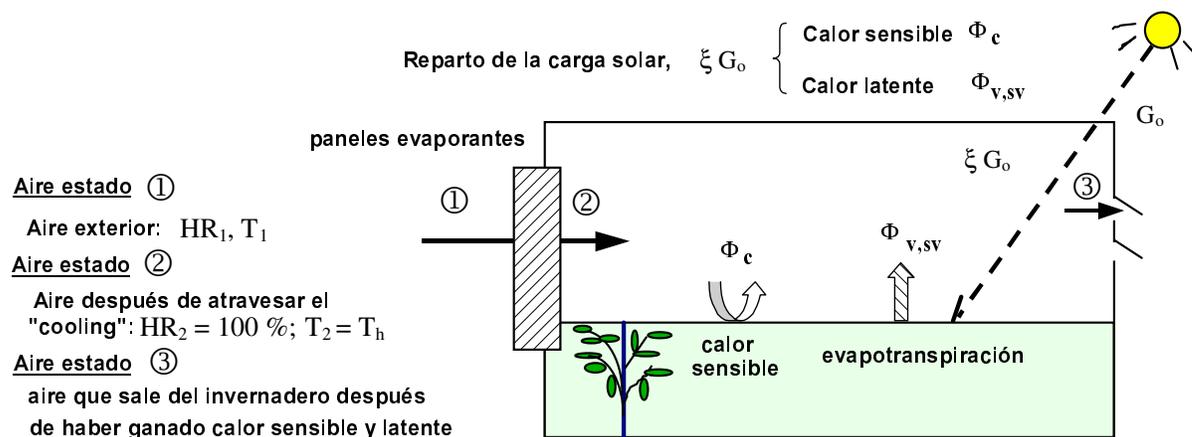


Figura 4. Representación esquemática de los pasos a tener en cuenta para dimensionar un panel evaporante (ver explicación en el texto).

Cuadro 3. Valores de las variables utilizadas para dimensionar un panel evaporante, partiendo de los datos de entrada (estado (1): temperatura exterior, T_1 y humedad relativa exterior, HR_1).

Caudal aire G_{ma} ($m^3 s^{-1}$)	T_1 ($^{\circ}C$)	HR_1 (%)	Densidad aire ρ_1 ($kg m^{-3}$)	Tensión vap. Sat. $e^*_s(T_1)$ (kPa)	Tensión vap. actual e_1 (kPa)	Hum. abso. actual q_1 ($g kg^{-1}$)	Entalp. total E_{t1} ($kJ kg^{-1}$)
30	38	35	1,149	6,63	2,32	14,1	73,06
Fórmulas utilizadas (Lectura complementaria Parte II)							
$e^*_s(T) = 0,6107 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_1}{3}\right) \right]^{8,827}$ (kPa)				$HR_1 = \left(\frac{e_1}{e^*_s(T_1)} \right) 100$ (%)			
$E_t = \left[C_p + C_{p,a} \left(\frac{q_1}{1000} \right) \right] T + \lambda \left(\frac{q_1}{1000} \right)$ ($kJ kg^{-1}$)				$q_1 = \frac{e_1}{R(T_1 + 273)} \frac{M}{\rho_1}$ ($g kg^{-1}$)			
0 $^{\circ}C$: $C_p = 1,006 kJ kg^{-1}$; $C_{p,a} = 1,805 kJ kg^{-1}$; $\lambda = 2500 kJ kg^{-1}$				$R = 0,00831 (kPa m^3 mol^{-1} K^{-1})$ $M = 18 (g mol^{-1})$			

- En el estado 2

Si consideramos la masa de aire exterior con una temperatura T_1 y una humedad relativa HR_1 , la temperatura más baja a la que puede enfriarse, después de atravesar el panel evaporante, corresponde a la temperatura húmeda, $T_h (= T'_2)$. Esta temperatura **representa la que tendría el aire si estuviese saturado** (humedad relativa: $HR'_2 = 100\%$) **sin que varíe su contenido energético**, es decir, sin que varíe su entalpía total, E_t y con un rendimiento del panel $R = 100\%$ (Figura 5).

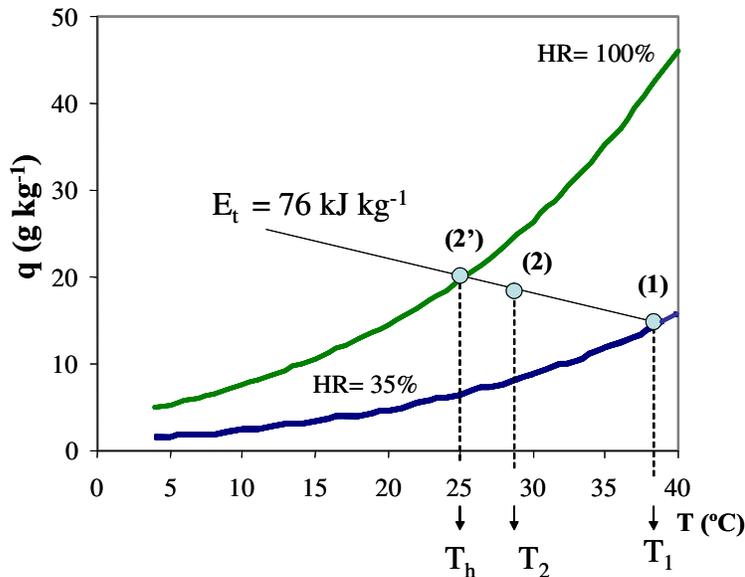


Figura 5. Ejemplo de evolución de la humedad absoluta del aire (q_a , $g_{vapor\ agua} kg_{aire}^{-1}$) exterior (estado 1) al atravesar el panel evaporante: estado (2') si el rendimiento del panel fuese del 100%; estado (2) para un rendimiento del panel del 75%. En el curso del proceso el contenido energético del aire permanece constante, $E_t = 76 kJ kg^{-1}$.

Como puede observarse en el ejemplo de la Figura 5 cuando una masa de aire exterior, con $HR_1 = 35\%$ y $T_1 = 38^{\circ}C$, atraviesa un panel evaporante:

- A la salida del panel, su temperatura húmeda es $T_h = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- En el curso del proceso, el contenido energético (entalpía) de la mezcla aire-vapor permanece constante ($E_t = 76 \text{ kJ kg}^{-1}$).
- Considerando que el rendimiento del panel fuese del un 100 %, el salto térmico entre la entrada (estado 1) y la salida (estado 2') del panel es $\Delta T = 38 - 25 = 13 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Considerando un caso real, por ejemplo, $R = 75 \text{ } \%$, la temperatura real a la salida del panel sería (estado 2):

$$T_2 = T_1 - (T_1 - T_h) R / 100$$

Lo que equivale en el ejemplo de la Figura 5 a un valor de temperatura $T_2 = 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conociendo la temperatura seca y la húmeda en el estado (2), se pueden determinar el resto de las variables de estado del aire húmedo siguiendo el ejemplo que se da en el Cuadro 4. Comparando los valores de los Cuadros 3 (estado 1) y 4 (estado 2), se deduce que:

- El salto térmico al atravesar el panel equivale a $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($=38-28,3$)
- El incremento en humedad absoluta es $\Delta q = 4,4 \text{ g kg}^{-1}$ ($= 18,5- 14,1$)
- La humedad relativa ha pasado de $HR_1 = 35 \text{ } \%$ a $HR_2 = 77 \text{ } \%$
- El caudal másico de aire $D_{ma} = \rho G_{ma}$, para $\rho = 1,20 \text{ kg m}^{-3}$, es $D_{ma} = 36,0 \text{ kg s}^{-1}$

Conociendo D_{ma} y Δq se puede evaluar la tasa de evaporación del panel, E_p (g s^{-1}):

$$E_p = D_{ma} \Delta q \tag{6}$$

siendo $E_p = 158,4 \text{ g s}^{-1}$

Este valor de E_p es un indicador del caudal de agua punta que exige el sistema. En la práctica, se necesita más del doble del valor de E_p si se tiene en cuenta la cantidad de agua que no se evapora.

- En el estado 3

Al atravesar el invernadero, el aire experimenta una ganancia de calor sensible y de calor latente. El aumento en temperatura y del contenido de humedad del aire depende, en gran parte, de la carga solar que recibe el invernadero y *de cómo se reparte esta carga entre calor sensible*, que va a contribuir a aumentar la temperatura del invernadero, y *calor latente* (evapotranspiración) (Figura 4). Esto implica que, para un invernadero de una determinada longitud, el gradiente de temperatura que se establece con el sistema de paneles, en el sentido del flujo de aire, será tanto más elevado cuanto menor sea el flujo de evapotranspiración. Es decir, cuanto menor sea la fracción de la carga solar que se transforma en calor latente a través del proceso de evapotranspiración.

Cuadro 4. Variables de estado del aire al atravesar el panel, rendimiento $R = 75 \%$, para condiciones de aire exterior (estado 1) $T_1 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$, $HR_1 = 35 \%$ y fórmulas utilizadas en cada caso.

$T_2=T_h$ ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	Tensión vap. sat. $e^*_s(T_h)$ (kPa)	Tensión vap. sat. $e^*_s(T_2)$ (kPa)	Tensión vapor actual e_2 (kPa)	Humedad relativa HR_2 (%)	Hum. abso. q_2 (g kg^{-1})
25	28,3	3,17	3,85	2,96	77	18,5
Fórmulas utilizadas (Lectura complementaria Parte II)						
$e^*_s(T) = 0,6107 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T}{3}\right) \right]^{8,827} \quad (\text{kPa})$				$e_2 = e^*_s(T_h) - 0,066(T_2 - T_h)$		
				en kPa $q_2 = \frac{e_2}{R(T_2 + 273)} \frac{M}{\rho_2}$		
				en g kg^{-1}		
$E_t = \left[C_p + C_{p,a} \left(\frac{q}{1000} \right) \right] T + \lambda \left(\frac{q}{1000} \right) \quad (\text{g kg}^{-1})$				$HR = \left(\frac{e_2}{e^*_s(T_2)} \right) 100$		
$0^\circ\text{C}: C_p = 1,006 \text{ kJ kg}^{-1}; C_{p,a} = 1,805 \text{ kJ kg}^{-1}; \lambda = 2500 \text{ kJ kg}^{-1}$						

Para determinar el estado del aire a la salida del invernadero es preciso conocer cómo se reparte la carga solar que recibe el invernadero (ξG_o) entre calor sensible, Φ_c , y latente, $\Phi_{L,sv}$. Si consideramos que la radiación neta representa de día bajo invernadero un 80 % de la carga solar:

$$R_n = 0,8 \xi G_o = \Phi_{L,sv} + \Phi_c$$

siendo $\Phi_{L,sv}$ = equivalente energético del flujo de evapotranspiración ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Φ_c = flujo de calor sensible ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Conocido el valor de R_n para el que se va a hacer el diseño, se puede evaluar el flujo de evapotranspiración aplicando Ecn. 3 y calcular luego su equivalente energético, $\Phi_{L,sv}$. En el ejemplo que se propone en lo que sigue, se toman como datos de partida los que se dan en el Cuadro 5:

Cuadro 5. Condiciones climáticas y valores utilizados para evaluar el orden de magnitud de ET_o . G_o es la radiación global solar exterior y $\xi (=07)$ representa el coeficiente de captación de radiación solar del invernadero.

Radiación solar ξG_o ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Radiación neta R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) $R_n = 0,8 \xi G_o$	Temp. T_a ($^\circ\text{C}$)	$e^*_s(T_2)$ (kPa)	Hum. relat. HR_a (%)	Défic. sat. D_a (kPa)	δ (kPa K^{-1})	u_a (m s^{-1})
2 ($\approx 555 \text{ W m}^{-2}$)	1,6 ($\approx 445 \text{ W m}^{-2}$)	28,3	3,85	77	0,9	0,174	0,3

Con estos datos, se deduce que el valor horario de ET_o corresponde a:

$$ET_o = \frac{(0,174)(1,6) / 2,5}{0,174 + 0,066(1 + (0,34)(0,3))} + \frac{0,066(37,5 / (28,3 + 273))(0,3)(0,9)}{0,174 + 0,066(1 + (0,34)(0,3))} = 0,47 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

Para un cultivo con un coeficiente de $K_c = 0,6$:

$$ET_c = (0,6)(0,47) = 0,282 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

El equivalente energético del flujo de evapotranspiración

$$\Phi_{L,sv} = 10^6 \lambda \frac{ET_c}{3600} \cong 196 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (7)$$

siendo el flujo de calor sensible:

$$\Phi_c = 445 - 196 = 249 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Es decir, alrededor de un 45 % ($196 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de R_n ($= 445 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) se utiliza en el proceso de evapotranspiración. El resto se utiliza como calor sensible contribuyendo a aumentar la temperatura interior. Es importante conocer este reparto pues da acceso a estimar el incremento de temperatura, ΔT , y de humedad absoluta, Δq , que experimenta el aire a la salida de invernadero. Si consideramos un invernadero con una superficie $S = 1000 \text{ m}^2$:

$$\Delta T = \frac{S \Phi_c}{D_{ma} C_p} \quad (8)$$

Para $D_{ma} = 36,0 \text{ kg s}^{-1}$, $C_p = 1003,2 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, el valor de $\Delta T = 6,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\Delta q = \frac{S \Phi_{L,sv}}{\lambda D_{ma}} \quad (9)$$

Para $\lambda = 2,5 \cdot 10^3 \text{ J g}^{-1}$, el valor de $\Delta q \approx 2,2 \text{ g kg}^{-1}$

Si volvemos de nuevo a los datos que se recopilan en el Cuadro 5, los valores de temperatura y de humedad absoluta a la salida del invernadero (estado 3) son:

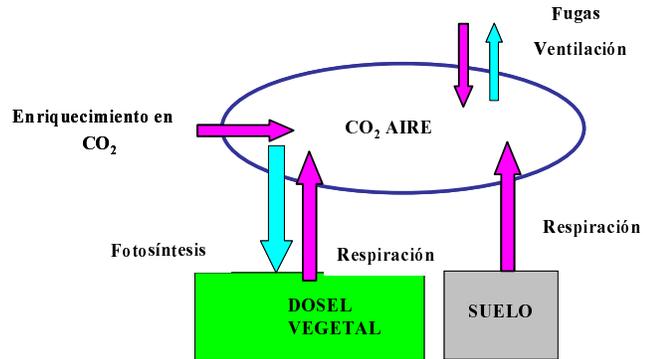
$$T_3 = 28,3 + 6,9 = 35,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q_3 = 18,5 + 2,2 = 20,7 \text{ g kg}^{-1}$$

2- BALANCE DE CO₂ SIN Y CON ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO

El contenido en CO₂ del aire invernadero varía en función de los aportes (aire exterior cuando no hay enriquecimiento en CO₂, y respiración del suelo) y del *sumidero de CO₂ representado por la fotosíntesis neta del cultivo*. Cuando se aplica enriquecimiento carbónico, a un nivel superior a la concentración exterior (del orden de 350-400 ppm), la ventilación representa también una pérdida de CO₂.

Durante el día, la variación temporal del nivel de CO₂ del aire depende de la interacción que se establece entre las fuentes de CO₂ (el proceso de ventilación cuando no se aplica enriquecimiento carbónico y el aporte de CO₂ artificial) y las pérdidas o sumideros (consumo de CO₂ por las plantas). De noche, se produce el fenómeno inverso, debido a la actividad respiratoria de los microorganismos del suelo y de las plantas (Parte III, Unidad 2).



2.1- Estimación de fuentes y sumideros de CO₂

A- Flujo de CO₂ a través de la ventilación

El intercambio de CO₂ a través de la ventilación, se puede evaluar de forma similar a la que se ha hecho para analizar el vapor de agua (Apartado 1.1A), en función del producto del coeficiente de intercambio fugas-ventilación, h_{fv} , y del gradiente de concentración entre el interior, C_a y exterior C_o :

$$\Phi_{C,vf} = h_{fv} \frac{f_C}{\rho} (C_a - C_o) \quad (10a)$$

con h_{fv} ($\text{kg}_{\text{aire}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) definido por Ecn. 1b:

$$\Phi_{C,vf} = \frac{V}{S} f_C Z (C_a - C_o) \quad (10b)$$

donde:

$\Phi_{C,fv}$ = densidad de flujo de CO₂ ($\text{gCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), C = concentración de CO₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), f_C = coeficiente para pasar de $\mu\text{mol mol}^{-1}$ a $\text{gCO}_2 \text{m}^{-3}_{\text{aire}}$ ($1 \mu\text{mol mol}^{-1} \equiv 0,00196 \text{g m}^{-3}$).

En el Cuadro 6 se muestran ejemplos el orden de magnitud de $\Phi_{C,fv}$ para diferentes valores de Z y del gradiente $\Delta C (= C_a - C_o)$.

Puede observarse que, de noche, para un valor de Z representativo de un invernadero estanco y una concentración de CO₂ interior de 450 ppm, la ventilación supone una pérdida de CO₂ de $0,6 \text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Si consideramos que Z y la tasa de respiración permanecen constantes durante 8 horas en un invernadero de 1000m^2 , la pérdida nocturna de CO₂ se eleva a 4,8 kg.

Cuadro 6. Orden de magnitud del flujo de CO₂ que se pierde o gana a través de la ventilación-fugas, $\Phi_{c,fv}$ (Ecn. 10), para diferentes valores de Z y del gradiente ΔC ($= C_a - C_o$), considerando la concentración exterior $C_o = 380$ ppm.

Condiciones	Z (m ³ m ⁻³ h ⁻¹)	$\Delta C = C_a - C_o$ (ppm)	$\Phi_{c,fv}$ (g m ⁻² h ⁻¹)	El proceso de ventilación conlleva
De noche, ventilación cerrada $\Delta C > 0$ debido a la respiración	1	70	0,6	Pérdida de CO ₂
De día, ventilación cerrada $\Delta C < 0$ debido a la fotosíntesis	1	- 230	-1,95	Ganancia de CO ₂
De día, ventilación abierta $\Delta C < 0$ debido a la fotosíntesis	15	-80	-10,16	Ganancia de CO ₂
De día, ventilación cerrada $\Delta C > 0$ debido al enriquecimiento en CO ₂	1	320	2,71	Pérdida de CO ₂

De día, sin enriquecimiento carbónico, los valores de ΔC que se da en el cuadro 6 (-230 ppm y -80 ppm) son representativos de invernaderos con cultivos desarrollados, lo que indica que la depresión que ejerce la fotosíntesis no es compensada con una entrada equivalente de CO₂ a través de la ventilación, ya sea porque el invernadero está cerrado o porque la tasa de renovación es baja.

El enriquecimiento carbónico con la ventilación cerrada conlleva una pérdida importante de CO₂ que hay que comparar con el impacto que ejerce el enriquecimiento en el proceso fotosintético y cómo repercute la inyección carbónica, a largo plazo, en la atribución de asimilados a los órganos cosechables (productividad de la cosecha). El cociente entre la ganancia esperable en términos de cosecha y el consumo total de CO₂ debe de utilizarse como un indicador de la eficiencia del enriquecimiento carbónico.

B- FLUJO DE CO₂ INHERENTE AL PROCESO FOTOSINTÉTICO

El nivel al que se establece la tasa de fotosíntesis neta de un cultivo depende esencialmente de la respuesta de la especie a las condiciones de radiación solar, de temperatura y de concentración de CO₂. No existe una relación general para evaluar la tasa fotosintética, siendo ésta una característica de la especie, lo que exige que se conozcan los parámetros característicos que la determinan (eficiencia a la luz y al CO₂, punto de compensación a la luz y al CO₂, etc.).

La Figura 6 muestra un ejemplo de la influencia que ejerce la radiación visible (fotosintéticamente activa) y la concentración de CO₂ en la fotosíntesis neta de un cultivo de rosas que se ha evaluado a escala de la planta entera.

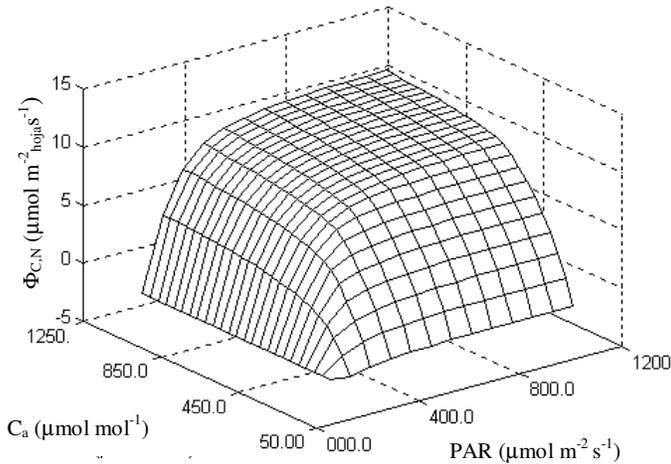


Figura 6. Influencia de la radiación PAR y de la concentración de CO₂ en la fotosíntesis neta de un cultivo de rosas.

La respuesta al CO₂ y a la radiación PAR puede describirse de forma sencilla a partir de una doble hipérbola. Para un cultivo de rosas puede utilizarse la relación siguiente (González-Real, 1995):

$$\Phi_{C,N} = -6,0 \cdot 10^{-5} \text{ ISF} + 10^{-3} \text{ ISF} \left(\frac{\text{PAR}}{173,5 + \text{PAR}} \right) \left(\frac{C_a}{378,9 + C_a} \right) \quad (11)$$

donde $\Phi_{C,N}$ = fotosíntesis neta en $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2}_{\text{suelo}} \text{ s}^{-1}$, ISF = índice de superficie foliar ($\text{m}^2_{\text{hoja}} \text{ m}^{-2}_{\text{suelo}}$), PAR = radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol}_{\text{fotones}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), C_a = concentración de CO₂ al interior del invernadero ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).

En la Ecn. (11) la respiración oscura corresponde a $\Phi_{C,R} = -6,0 \cdot 10^{-5} \text{ ISF}$ ($\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2}_{\text{suelo}} \text{ s}^{-1}$). La radiación fotosintéticamente activa o radiación visible (PAR, $\mu\text{mol}_{\text{fotones}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) se puede deducir de la radiación global solar, (W m^{-2}) a partir de la relación $\text{PAR} = (G/2)(4,56)$.

El Cuadro 7 presenta el orden de magnitud de $\Phi_{C,N}$ para los valores de C_a fijados previamente en el apartado 2.1A, donde puede observarse la influencia que ejercen en la tasa fotosintética la depresión de CO₂ ($C_a = 150$ y $300 \mu\text{mol mol}^{-1}$) en el aire del invernadero respecto al exterior y el enriquecimiento carbónico ($C_a = 700 \mu\text{mol mol}^{-1}$).

Cuadro 7. Orden de magnitud de la fotosíntesis neta, $\Phi_{C,N}$ (Ecn. 1), para un cultivo de rosas con diferentes valores de C_a al interior del invernadero.

Cultivo de rosas	C_a ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	$\Phi_{C,N}$ ($\text{g m}^{-2}_{\text{suelo}} \text{ h}^{-1}$)
De noche: PAR = 0, ISF = $3 \text{ m}^2_{\text{hoja}} \text{ m}^{-2}_{\text{suelo}}$	450	-0,65
De día:	150	1,96
- PAR = $1000 (\mu\text{mol}_{\text{fotones}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$, lo que equivale a una radiación global solar $G = 438,6 (\text{W m}^{-2})$	300	3,40
- ISF = $3 \text{ m}^2_{\text{hoja}} \text{ m}^{-2}_{\text{suelo}}$	700	5,30

2.2- APLICACIÓN A LA PREVISIÓN DE LA CONCENTRACIÓN INTERIOR DE CO₂

La variación que experimenta el contenido en CO₂ del aire por unidad de tiempo, Δt, es la resultante entre los aportes (fuentes) y pérdidas de CO₂ (sumideros) del sistema. Si consideramos el caso en el que se aplica inyección carbónica, el balance es (Figura 7):

$$\frac{V}{S} f_C \frac{\Delta C}{\Delta t} = -\Phi_{C,F} + \Phi_{C,R} + \Phi_{C,I} \pm \Phi_{c,f,v} \quad (12)$$

con:

ΔC, en μmol mol⁻¹; Φ = densidad de flujo de CO₂ (g CO₂ m⁻² s⁻¹) inherente al proceso fotosintético (Φ_{CN} = -Φ_{C,F} + Φ_{C,R}) y al enriquecimiento carbónico, Φ_{C,I}.

A partir de Ecn. (12), se puede deducir la concentración de CO₂ del aire. Si consideramos condiciones de régimen estacionario, ΔC/Δt = 0, (ver análisis en condiciones de régimen transitorio en Aplicación 04_TecInv_CO2.doc), tenemos:

- Sin inyección carbónica, Φ_{C,I} = 0

$$\Phi_{C,fv} = -\Phi_{C,N} \quad (13a)$$

con Φ_{C,vf} definido por Ecn. 10b tenemos:

$$\frac{V}{S} f_C Z (C_a - C_o) = -\Phi_{C,N} \quad (13b)$$

La ecuación 13b se utiliza (i) para evaluar el valor de C_a que induce un determinado nivel de Z cuando se conoce el consumo de CO₂ debido a la fotosíntesis, (ii) o bien para determinar la tasa de renovación del aire que requiere el mantener un valor determinado de C_a. En el primer caso (i), se obtiene:

$$C_a = C_o - \frac{\Phi_{C,N}}{(V/S)f_C Z} \quad (14)$$

En periodo de noche, para un invernadero con Z = h⁻¹, V/S = 3 m y una tasa de respiración de 0,15 g m⁻² h⁻¹, se deduce de Ecn. 14 que, al cabo de una hora, C_a alcanza ≈ 405 μmol mol⁻¹, es decir un incremento de 25 μmol mol⁻¹ con respecto al exterior (C_o = 380 μmol mol⁻¹) Si consideramos que la tasa de respiración prevalece durante seis horas, la concentración del invernadero será 150 μmol mol⁻¹ superior a la del exterior, siendo estos valores típicos de un invernadero estanco con un cultivo desarrollado.

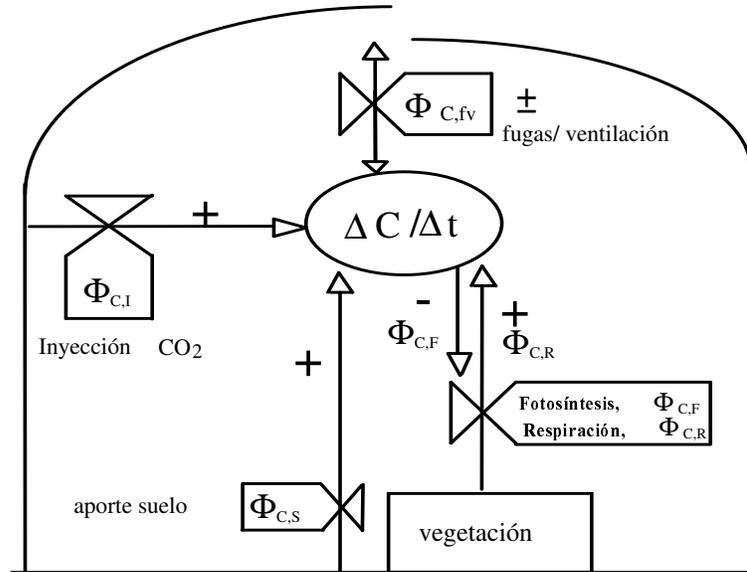


Figura 7. Representación esquemática de los flujos que determinan el balance de CO₂ en invernadero, con:

- $\Delta C/\Delta t$ = variación temporal de la concentración de CO₂ del aire interior
- Φ_C = densidad de flujo de CO₂, siendo: $\Phi_{C,F}$ = fotosíntesis bruta, $\Phi_{C,R}$ = respiración, $\Phi_{C,fv}$ = CO₂ por fugas/ventilación, $\Phi_{C,S}$ = CO₂ que proviene del suelo (≈ 0 en suelo con acolchado plástico), $\Phi_{C,I}$ = aporte por enriquecimiento carbónico.

Para un día de invierno, en el que la ventilación debe permanecer cerrada ($Z = h^{-1}$), se deduce de Ecn. 14 que C_a alcanza $\approx 245 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para $\Phi_{C,N} = 0,8 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Es decir, una depresión respecto al exterior de $135 \mu\text{mol mol}^{-1}$, mientras que C_a alcanza un valor cercano de la concentración exterior ($\approx 366 \mu\text{mol mol}^{-1}$) con un nivel de $Z = 10 \text{ h}^{-1}$. La figura 8 muestra un ejemplo de la tasa de renovación de aire que se necesita para mantener una concentración cercana de la del exterior para diferentes valores de tasa fotosintética.

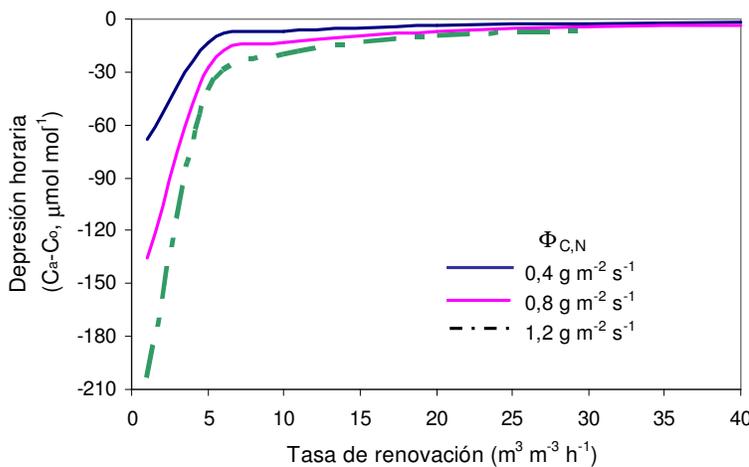


Figura 8.

Evolución de la depresión de la concentración de CO₂ dentro del invernadero, C_a , respecto a la del exterior, C_o , en función de la tasa de renovación para diferentes valores de la tasa de fotosíntesis, $\Phi_{C,N}$, utilizando la ecuación 13.

- Con inyección carbónica

Cuando se aplica enriquecimiento carbónico, se deduce de la ecuación 14 que la tasa de inyección debe de compensar el consumo debido al proceso fotosintético y las pérdidas de CO₂ a través de las fugas-ventilación:

$$\Phi_{C,I} = \Phi_{C,N} + \frac{V}{S} f_C Z(C_a - C_o)$$

La Figura 9 muestra un ejemplo del consumo de CO₂ a lo largo de un día de invierno para un cultivo desarrollado (ISF = 3), calculados con una tasa de renovación entre 1.0-2,5 h⁻¹ y valores máximos de PAR a medio día de 700 μmol m⁻² s⁻¹.

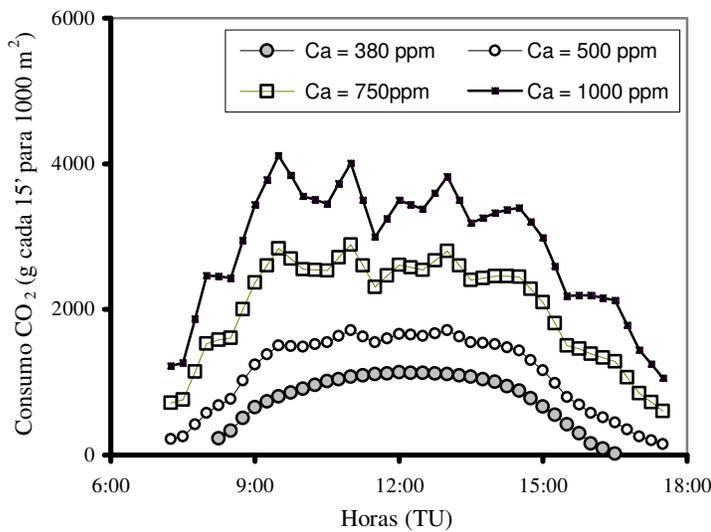


Figura 9. Consumo de CO₂, para mantener una concentración igual a la del exterior, C_a = 380 μmol mol⁻¹, y para diferentes niveles de enriquecimiento carbónico, con ISF = 3, en un invernadero de 1000 m², un día de invierno con una tasa de renovación entre 1,0-2,5 h⁻¹ y valores máximos de PAR a medio día de 700 μmol m⁻² s⁻¹.

2.3- OPTIMIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂ EN EL INVERNADERO

La decisión de invertir en un sistema de enriquecimiento carbónico depende de los beneficios que se espera obtener en cuanto a productividad y ganancia en calidad de la cosecha y del coste del CO₂. Nos encontramos frente a un problema de optimización económica en el que la función a maximizar es la diferencia entre la ganancia esperada y el coste de la inyección.

Se puede abordar la optimización mediante el uso de modelos de ventilación y de fotosíntesis. En este caso, se obtiene un óptimo “aparente” de enriquecimiento carbónico que puede utilizarse para estudiar, a corto plazo, la influencia que ejerce el CO₂ en el proceso fotosintético y el gasto que hay que prever con el invernadero cerrado o diferentes estrategias de ventilación (Figura 11). Sin embargo, a partir de este tipo de análisis (balance de masa utilizando modelos de fotosíntesis y de ventilación), no se puede inferir el interés que tendrá el aporte de CO₂ a largo plazo sobre la respuesta del cultivo. Para ello, es preciso disponer, además, de modelos de crecimiento y desarrollo que integren cómo

repercute el incremento de la tasa fotosintética en el desarrollo foliar del cultivo y en la atribución de materia seca a los diferentes órganos de la planta.

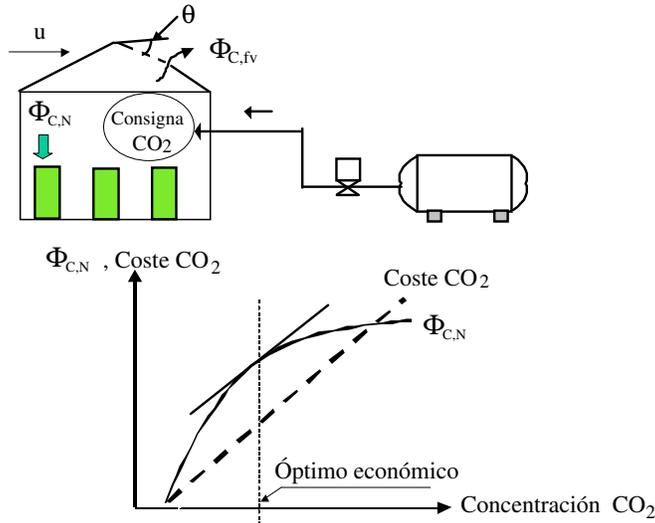


Figura 11. Enriquecimiento en CO₂ y óptimo económico de la inyección, utilizando como criterio la diferencia entre la ganancia (fotosíntesis) menos los costes (precio de la inyección carbónica).
 u = velocidad del viento, θ = ángulo de apertura de la ventilación, $\Phi_{C,N}$ = tasa de fotosíntesis neta, $\Phi_{C,I}$ = tasa de inyección de CO₂.

La Figura 12 presenta un ejemplo del incremento del rendimiento de un cultivo de tomate (ΔR , kg m⁻²) para diferentes niveles de inyección (C_a : 400-1000 ppm), respecto al rendimiento que se obtendría con un invernadero sin inyección (con $C_a = 375$ ppm), comparado con el consumo de CO₂ (kg m⁻²) que conlleva el compensar la tasa de fotosíntesis y las pérdidas por fugas. Como era de esperar, el consumo de CO₂ presenta un mayor incremento con C_a que el rendimiento. Puede observarse que ΔR presenta un fuerte aumento para los primeros niveles de inyección, que disminuye sensiblemente a partir de unos 600 ppm. Esto explica que el óptimo económico de inyección difiera del óptimo que presenta el incremento del rendimiento.

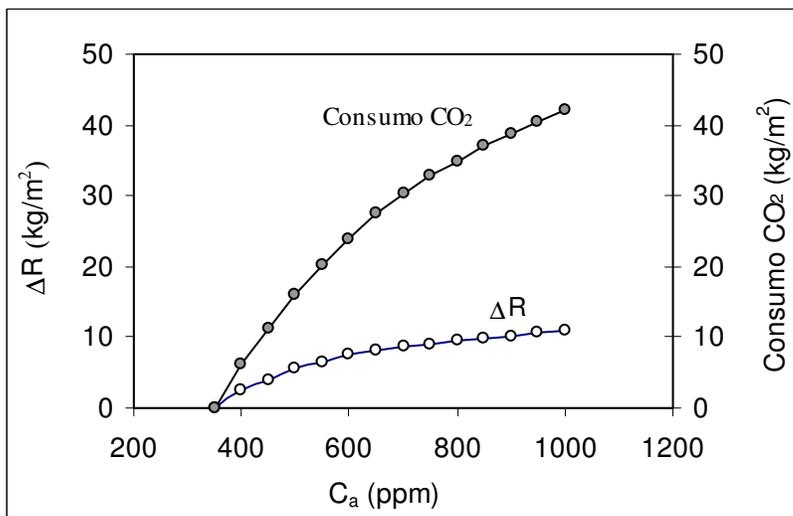


Figura 12. Comparación del incremento del rendimiento de un cultivo de tomate, ΔR , respecto al rendimiento de un invernadero sin inyección, y del consumo en CO₂ para diferentes niveles de inyección CO₂ (C_a). (Valores estimados con el modelo Tomgrow).

Si consideramos que el precio medio de venta de los frutos es de 1 € kg^{-1} y un coste del CO_2 de $0,16 \text{ €}$, se puede observar en la Figura 13 que el máximo de ganancia se obtiene con un nivel de inyección de unos 500 ppm y que, por encima de 650 ppm , el enriquecimiento carbónico representa, en este caso concreto, una pérdida.

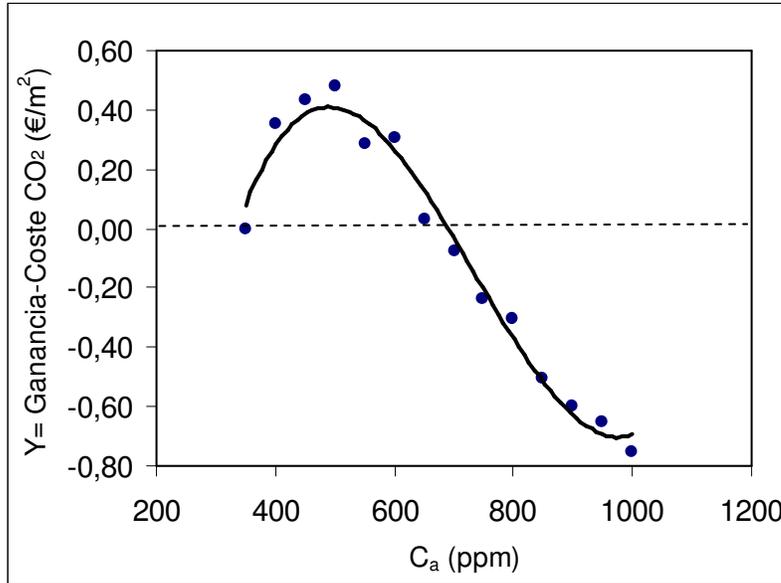


Figura 13. Evolución de la diferencia entre la ganancia en rendimiento de un cultivo de tomate y el coste de CO_2 . Se ha considerado un precio de venta de frutos de 1 € kg^{-1} y un coste del CO_2 de $0,16 \text{ € kg}^{-1}$ (ver Figura 12).

El ejemplo que acabamos de mostrar (Figuras 12 y 13) explica que sea aconsejable recurrir a algoritmos de optimización de la inyección carbónica (Figura 14) que integren la influencia que ejerce la inyección carbónica a corto plazo (modelos de fotosíntesis y de ventilación) y a largo plazo (modelos de previsión del rendimiento) con el objeto de generar la estrategia de enriquecimiento que conlleva una ganancia neta para el productor.

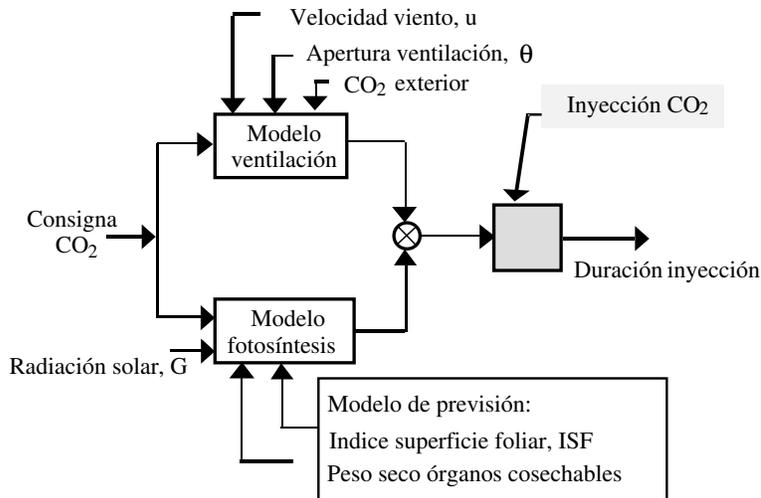


Figura 14. Modelos utilizados en un algoritmo de optimización de la concentración de CO_2 .

