

**M. M. GONZÁLEZ-REAL y A. BAILLE**

Área de Ingeniería Agroforestal

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica  
Universidad Politécnica de Cartagena

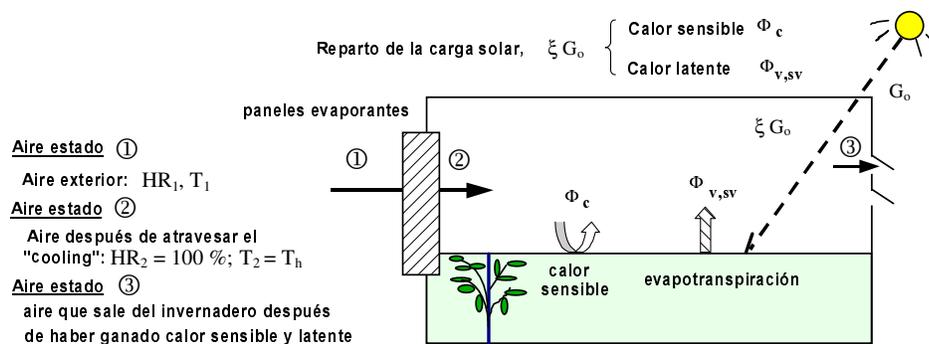
Correo electrónico:

[mayla.gonreal@upct.es](mailto:mayla.gonreal@upct.es)

[alain.baille@upct.es](mailto:alain.baille@upct.es)

## PARTE IV

# MODELOS DE BALANCE DE ENERGÍA Y DE MASA



## Contenido de la Parte IV

### Material de lectura:

- *Unidad 1. Balances de energía y de masa. Revisión de Conceptos de base*
- *Unidad 2. Modelos de balance de energía*
- *Unidad 3. Modelos de balance de masa*

### Referencias

### Lectura complementaria

### Aplicaciones:

- Determinación de coeficientes de convección
- Diseño de un sistema de calefacción
- Diseño de un sistema de enriquecimiento carbónico
- Diseño de paneles evaporantes
- Diseño de un sistema de nebulización

Cartagena, 2005



## PARTE IV. UNIDAD 1. BALANCES DE ENERGÍA Y DE MASA

### Revisión de conceptos de base

#### 1. INTRODUCCIÓN

El invernadero puede considerarse como un sistema integrado por diferentes componentes (pared de cubierta, suelo, dosel vegetal) que intercambian con el aire interior no solamente energía sino también masa a través de procesos de condensación, de evaporación, y de transpiración y fotosíntesis. La pared de cubierta juega además un papel importante en la formación del microclima:

- (i) Modifica el clima radiante bajo invernadero, lo que resulta en una reducción de la radiación solar disponible a nivel del dosel vegetal.
- (ii) Frena la intensidad con la que se renueva el aire interior, lo que redundará por un aumento de la temperatura y del nivel de humedad del aire <sup>1</sup> y genera además fluctuaciones diurnas de la concentración de CO<sub>2</sub> superiores a las que prevalecen en los cultivos al aire libre.

Por eso, las condiciones microclimáticas que se establecen en un medio confinado como es el invernadero son muy diferentes de las observadas en los cultivos al aire libre. Por ejemplo, los procesos de transferencia de vapor de agua (transpiración) y de CO<sub>2</sub> (fotosíntesis) entre el dosel vegetal y la atmósfera modifican la concentración de estas dos variables en el aire interior. Los intercambios de vapor de agua entre el suelo y el aire, y entre el aire y la pared, ponen también en juego procesos de evaporación y de condensación que juegan un papel clave en el nivel de la humedad interior. Cuando no existen medios de climatización (otros que la acción manual sobre la ventilación), el agricultor tiene que adaptar el periodo de producción a las condiciones climáticas locales, debido a que el clima interior viene sobre todo impuesto por el clima exterior. En invernaderos dotados con medios de climatización (calefacción, enriquecimiento carbónico, pantallas de sombreado y térmicas, nebulización, etc.), el agricultor tiene la posibilidad de llevar a cabo un manejo más racional de las variables climáticas.

Las principales variables que se pueden controlar en invernadero son la temperatura, la humedad y la concentración de CO<sub>2</sub> del aire <sup>2</sup>. Estas tres variables son las resultantes de los procesos de transferencia de energía y de masa que se establecen entre el volumen del aire interior y los diferentes compartimentos del invernadero. Si se quieren controlar bajo invernadero las condiciones de crecimiento y de desarrollo del cultivo, es obvio que deben de conocerse los procesos físicos y fisiológicos implicados en las transferencias al igual que las interacciones entre las diferentes componentes del invernadero y el medio aéreo.

---

<sup>1</sup> Salvo bajo condiciones de estrés térmico o hídrico que limitan la transpiración del cultivo. Es el caso del verano, cuando no es posible limitar las altas temperaturas.

<sup>2</sup> El enriquecimiento carbónico permite mantener un nivel de consigna de concentración de CO<sub>2</sub>. La calefacción permite mantener un nivel de consigna de temperatura de aire. **El despliegue de una pantalla de sombreado no permite mantener un nivel de consigna de radiación global solar**: la radiación solar del invernadero viene esencialmente impuesta por las condiciones de radiación que existen al exterior del invernadero.

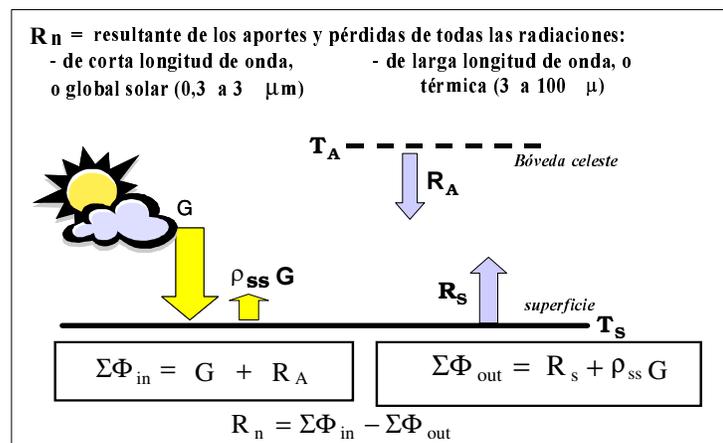
## 2. BALANCE DE ENERGÍA RADIANTE

### 2.1- CONCEPTO DE RADIACIÓN NETA

Se conoce como radiación neta ( $R_n$ ) el balance del conjunto de intercambios por radiación de longitud de onda corta (origen solar, 0.3-3  $\mu\text{m}$ ) y de longitud de onda larga (> 3  $\mu\text{m}$ ) en una superficie. Se puede definir como la suma algebraica de la radiación total incidente (o ganancia de energía) y la radiación total emitida. Luego,  $R_n$  (Figura 1) representa la energía que absorbe la superficie que equivale a la diferencia entre los aportes,  $\Sigma\Phi_{in}$ , y las pérdidas,  $\Sigma\Phi_{out}$  ( $R_n = \Sigma\Phi_{in} - \Sigma\Phi_{out}$ ):

- Aportes de longitud de onda corta: radiación global solar,  $G$ .

- Pérdidas de longitud de onda corta: radiación global solar reflejada por la superficie:  $\rho_{ss} G$ .



**Figura 1.** Radiación neta,  $R_n$ , de una superficie plana que no transmite la radiación.  $G$  = radiación global solar,  $\rho$  = coeficiente de reflexión de la superficie,  $R_A$  y  $R_s$  son, respectivamente, la radiación de longitud de onda larga emitida por la atmósfera y por la superficie.

- Aportes de longitud de onda larga: radiación emitida por la atmósfera,  $R_A = \sigma T_A^4$ , siendo  $T_A$  = temperatura equivalente de la atmósfera (K) y  $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

- Pérdidas de longitud de onda larga: radiación emitida por la superficie:  $R_s = \epsilon \sigma T_s^4$ , siendo  $\epsilon$  el coeficiente de emisividad de la superficie y  $T_s$  la temperatura de la superficie en K, luego:

$$\Sigma\Phi_{in} = G + R_A \quad \text{y} \quad \Sigma\Phi_{out} = \rho_{ss} G + R_s$$

La energía radiante que absorbe la superficie determina su temperatura y afecta, indirectamente, a la temperatura del aire, a través de intercambios por convección entre la superficie y el aire. El Cuadro 1 presenta un ejemplo del orden de magnitud de las componentes del balance radiante de una superficie que no transmite la radiación, considerando que ésta es un vegetal con un coeficiente de reflexión para la radiación global solar  $\rho = 0.21$ .

**Cuadro 1.** Orden de magnitud de  $R_n$  y de sus componentes para una superficie que no transmite la radiación, con un coeficiente de reflexión para la radiación global solar  $\rho_{ss} = 0,21$

Componentes de $R_n$	de día		de noche
	despejado	nublado	despejado
$G$ ( $W\ m^{-2}$ )	700	200	0
$(1-\rho_{ss}) G$	553	158	0
$T_A$	5 °C (278 K)	10 °C (283 K)	-10 °C (263 K)
$R_A = \sigma T_A^4$ ( $W\ m^{-2}$ )	339	364	271
$T_S$ (°C)	20 °C (293 K)	15 °C (288 K)	5 °C (278 K)
$R_S = \sigma T_S^4$ ( $W\ m^{-2}$ )	418	390	339
$R_n = G(1-\rho_{ss}) + R_A - R_S$	474	132	-68

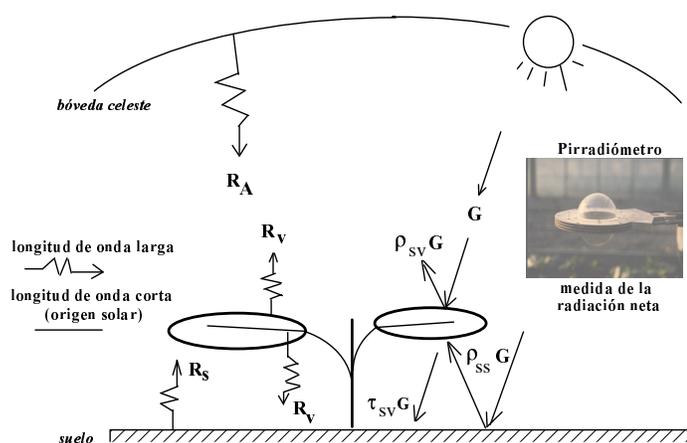
## 2.2- RADIACIÓN NETA DE UNA SUPERFICIE VEGETAL AL AIRE LIBRE

La Figura 2 muestra las componentes de la radiación neta de una superficie vegetal al aire libre. En lo que sigue las propiedades ópticas de las superficies, respecto a la radiación solar, vienen indicadas con un índice “s” ( $\tau_s, \rho_s, \alpha_s$ ), y con un índice l ( $\tau_l, \rho_l, \alpha_l$ ) respecto a la radiación de longitud de onda larga.

La radiación total incidente,  $\Sigma\Phi_{in}$ , es:

$$\Sigma\Phi_{in} = G(1 - \tau_{sv} - \rho_{sv}) + \alpha_{sv}\rho_{ss}G + R_A + R_s$$

El término  $(\alpha_{sv} \rho_{ss} G)$  representa la fracción de la radiación solar reflejada por el suelo que es absorbida por la vegetación ( $\alpha_{sv} = 1 - \tau_{sv} - \rho_{sv}$ ), luego:



**Figura 2.** Componentes de la radiación neta de una superficie vegetal al aire libre y sensor utilizado para medir  $R_n$  (ver Unidad 2).  $G$  = radiación global solar;  $\tau_s$  y  $\rho_s$  = coeficientes de transmisión y de reflexión de la superficie para la radiación solar global (índice “v” = vegetación, índice “s” = suelo);  $R_A, R_v$  y  $R_s$  = radiación emitida por la atmósfera, la vegetación y el suelo, respectivamente.

$$\Sigma\Phi_{in} = \alpha_{sv} G(1 + \rho_{ss}) + R_A + R_s$$

La radiación total emitida,  $\Sigma\Phi_{out}$ , corresponde a:

$$\sum \Phi_{\text{out}} = 2R_v$$

La radiación neta, se expresa entonces:

$$R_n = \alpha_{sv} (G + \rho_{ss}) + R_A + R_s - 2R_v \quad (1)$$

El primer término de la ecuación representa la radiación solar absorbida por la vegetación. De noche ( $G = 0$ ), la radiación neta depende esencialmente de  $R_A$  que varía, de  $220 \text{ W m}^{-2}$ , por cielo despejado, a  $420 \text{ W m}^{-2}$  por cielo muy cubierto. La superficie vegetal presentará, en periodo nocturno, un balance más negativo por condiciones de cielo despejado. Si, en primera aproximación, consideramos  $R_{su} \approx R_v$ :

$$R_n = R_A - R_v = \sigma(T_A^4 - T_v^4) \quad (2)$$

$R_A$  se puede calcular a partir de fórmulas que dan la temperatura aparente,  $T_A$ , de la bóveda celeste ( $R_A = \sigma T_A^4$ ), considerada como un cuerpo negro ( $\epsilon = 1$ ). También se puede definir con respecto a la temperatura del aire exterior,  $T_o$  ( $R_A = \sigma \epsilon_A T_o^4$ ), calculando la emisividad de la atmósfera por la fórmula de Brunt,  $\epsilon_A = 0,560 + 0,2529 \sqrt{e_o}$ , siendo  $e_o$  = tensión de vapor real del aire exterior en kPa (Lectura Complementaria Parte II).

### 2.3 - RADIACIÓN NETA DE UNA SUPERFICIE VEGETAL EN INVERNADERO

La Figura 2 muestra un ejemplo de las componentes de la radiación neta de un vegetal bajo invernadero. Partiendo de las consideraciones adoptadas en el Apartado 2.2, la radiación neta (Figura 3), se deduce de:

a)- La radiación total incidente que se expresa como:

$$\sum \Phi_{\text{in}} = \alpha_{sv} \tau_{sp} G (1 + \rho_{ss}) + \tau_{lp} R_A + R_{su} + \epsilon_{lp} R_p$$

La mayoría de paredes de cubierta poseen valores muy bajos de coeficiente de reflexión,  $\rho_{lp}$ . Considerando  $\rho_{lp}$  despreciable<sup>3</sup> ( $\epsilon_{lp} = 1 - \tau_{lp}$ ), tenemos:

$$\sum \Phi_{\text{in}} = \alpha_{sv} \tau_{sp} G (1 + \rho_{ss}) + \tau_{lp} (R_A - R_p) + R_{su} + R_p$$

b)- La radiación total emitida,  $\sum \Phi_{\text{out}}$ , corresponde a:

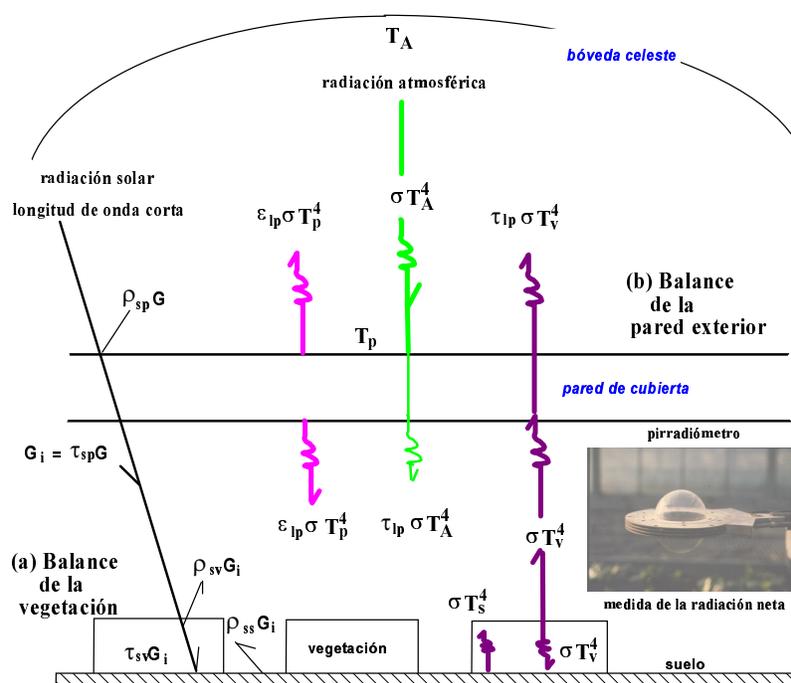
$$\sum \Phi_{\text{out}} = 2R_v$$

Siendo la radiación neta,  $R_{nv} = \sum \Phi_{\text{in}} - \sum \Phi_{\text{out}}$ :

$$R_{nv} = \alpha_{sv} \tau_{sp} G (1 + \rho_{ss}) + \tau_{lp} \sigma (T_A^4 - T_p^4) + \sigma (T_p^4 - T_v^4) + \sigma (T_s^4 - T_v^4) \quad (3)$$

<sup>3</sup> - La radiación que índice sobre un cuerpo semitransparente es en parte reflejada, en parte absorbida y en parte transmitida. Si consideramos que el cuerpo tiene un poder de reflexión  $\rho$ , de absorción  $\alpha$ , y de transmisión  $\tau$ , la ley de conservación de la energía establece que  $\rho + \tau + \alpha = 1$ .

- El poder de absorción ( $\alpha$ ) de un cuerpo coincide con su poder de emisión ( $\epsilon$ ) para la misma longitud de onda y temperatura (ley de Kirchoff:  $\alpha = \epsilon$ ), siendo  $\epsilon$  igual a 1 para un cuerpo negro.



**Figura 3.** Componentes de la radiación neta (a) de una superficie vegetal bajo invernadero y (b) de una pared de cubierta. Radiación solar al interior del invernadero:  $G_i$ ; Radiación atmosférica:  $R_A = \sigma T_A^4$ ; radiación emitida por la pared:  $R_p = \epsilon_{lp} \sigma T_p^4$ , radiación emitida por el suelo:  $R_s = \sigma T_s^4$ ; radiación emitida por la vegetación,  $R_v = \sigma T_v^4$ .

Comparando la Ecn.3 con la Ecn. 2, se puede observar que la radiación neta de una superficie vegetal en invernadero depende, entre otras variables, de las propiedades ópticas de la pared de cubierta en las longitudes de onda corta y larga.

En periodo de noche ( $G = 0$ ):

$$R_{nv} = \tau_{lp} \sigma(T_A^4 - T_p^4) + \sigma(T_p^4 - T_v^4) + \sigma(T_s^4 - T_v^4) \quad (4)$$

$R_{nv}$  alcanza en invernadero valores menos negativos que al exterior. El término  $\sigma(T_A^4 - T_p^4)$  es siempre negativo, por lo que  $\tau_{lp}$  determina, en parte, el valor de  $R_{nv}$ .

*Es decir, podemos considerar que la transmisión de la pared en la longitud de onda larga caracteriza la eficiencia de la pared como barrera térmica para frenar la energía radiante que pierden las superficies que protege (vegetación y suelo).*

El Cuadro 2 presenta los valores de las propiedades ópticas de hojas vegetales para la radiación solar (global, visible y próximo infrarrojo).

**Cuadro 2.** Valores de las propiedades ópticas de las hojas para la radiación solar (global, visible, próximo infrarrojo).

Propiedades ópticas	Radiación global solar 0,3-3,0 $\mu\text{m}$	Visible 0,4-0,7 $\mu\text{m}$	Próximo infrarrojo 0,7-3,0 $\mu\text{m}$
Transmisión ( $\tau_s$ )	0,20	0,06	0,34
Reflexión ( $\rho_s$ )	0,30	0,09	0,51
Absorción ( $\alpha_s$ )	0,50	0,85	0,15

## 2.4- RADIACIÓN NETA DE UNA PARED DE CUBIERTA

La radiación neta de una pared de cubierta,  $R_{np}$ , determina, junto con las pérdidas por convección de la pared,  $\Phi_{ce}$ , y las pérdidas por fugas ( $\Phi_f$ ), las pérdidas energéticas totales del invernadero (ver Unidad 2, Apartado 2.3). El total de estas pérdidas ( $R_{np} + \Phi_f + \Phi_{ce}$ ) corresponde al gasto energético que debería aportar un sistema de calefacción cuando se desea mantener la temperatura del aire a un nivel de consigna.

A partir de la Figura 3 (b: balance de la pared exterior) se deduce que la radiación neta de la pared,  $R_{np}$ , en periodo nocturno ( $G = 0$ ) es:

$$R_{np} = \Sigma\Phi_{in} - \Sigma\Phi_{out} = \sigma T_A^4 - \epsilon_{ip} \sigma T_p^4 - \tau_{ip} \sigma T_v^4 \quad (5)$$

Si consideramos, como en el caso anterior,  $\rho_{ip}$  despreciable y sustituimos  $\epsilon_{ip} = 1 - \tau_{ip}$  en la Ecn. (5) se obtiene la radiación neta de la pared de cubierta:

$$R_{np} = \sigma(T_A^4 - T_p^4) - \tau_{ip} \sigma(T_v^4 - T_p^4) \quad (6)$$

*La temperatura de la atmósfera es siempre inferior a la de la pared, mientras que la temperatura de la vegetación es, en general, superior a la de la pared. Por tanto, a partir de este ejemplo sencillo se deduce que cuanto mayor sea el coeficiente de transmisión de la pared,  $\tau_{ip}$ , en la longitud de onda larga, más negativa será la radiación neta de la pared, siendo mayores las pérdidas por radiación del invernadero.*

Se puede obtener una mejor evaluación de  $R_{np}$  a partir de la ecuación (7) que puede aplicarse a paredes con valores de  $\rho_{ip}$  diferentes de cero y con diferente coeficiente de emisividad por la cara interna ( $\epsilon_{lpi}$ ) y externa,  $\epsilon_{lpe}$ :

$$R_{np} = f_p \left( \sigma T_A^4 - \sigma T_v^4 \right) \left( \tau_{ip} + \frac{\epsilon_{lpe} \epsilon_{lpi}}{\epsilon_{lpe} + \epsilon_{lpi}} \right) \quad (7)$$

siendo  $f_p$  = factor de forma de la pared con la bóveda celeste que depende de la geometría del invernadero, y varía generalmente de 0.8 a 1 (pared de cubierta plana).

La ecuación (7) establece que las pérdidas por radiación dependen esencialmente de:

- Los aportes que provienen de la radiación atmosférica (término:  $\sigma T_A^4$ ).
- Las pérdidas térmicas de la vegetación (término:  $\sigma T_v^4$ ).

- Las propiedades ópticas de la pared de cubierta ( $\tau_{lp}$  y  $\epsilon_{lp}$ ).

Las propiedades ópticas de los cuerpos varían con la longitud de onda (Cuadro 1). El vidrio presenta un coeficiente de transmisión para la radiación solar de  $\approx 0.85$ , mientras que para la longitud de onda larga su coeficiente de transmisión es cercano de cero (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Valores aproximados de las características ópticas de la pared de cubierta en la longitud de onda larga ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ): coeficiente de transmisión ( $\tau_{lp}$ ) y coeficientes de emisividad de la cara superior ( $\epsilon_{lpe}$ ) e inferior ( $\epsilon_{lpi}$ ). Se ha considerado despreciable el coeficiente de reflexión.

Material de cubierta	$\tau_{lp}$	$\epsilon_{lpe}$	$\epsilon_{lpi}$
Vidrio baja emisividad (tratado con óxido de estaño por la cara exterior)	0,05	0,30	0,095
Vidrio normal	0,05	0,95	0,95
PVC	0,35	0,65	0,65
PE con tratamiento térmico	0,55	0,45	0,45
PE sin tratamiento térmico	0,70	0,30	0,30

### 3- BALANCE DE ENERGÍA

Cuando un elemento (p.e.: superficie o volumen) recibe energía, parte es almacenada, contribuyendo así a aumentar su energía interna como consecuencia de las variaciones de su temperatura y, parte, es disipada. El principio de **conservación de la energía** establece que la suma algebraica de los flujos energéticos que entran (**aportes**,  $\Sigma\phi_{Tin}$ ) y salen (**pérdidas**,  $\Sigma\phi_{Tout}$ ) de un elemento tiene que compensar la variación de energía **almacenada en su interior** ( $\Delta Q$ ,  $W$ ) por unidad de tiempo ( $\Delta t$ ,  $s$ ). El balance entre la energía almacenada, los aportes y las pérdidas se expresa mediante un **balance energético**<sup>(4)</sup>:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \Sigma\phi_{Tin} - \Sigma\phi_{Tout} \quad (8)$$

La variación de energía interna de un elemento puede expresarse en función de su capacidad térmica ( $C_T$ ,  $J \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), siendo  $C_T$  la variación de energía que induce en el elemento una variación de temperatura ( $\Delta T$ ):

$$\Delta Q = C_T \Delta T \quad (9)$$

La ecuación (9), integrada en la ecuación (8), da la variación de la temperatura del elemento en el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ):

<sup>4</sup> La unidad de flujo energético (energía por unidad de tiempo) es el **Vatio** ( $W$ ) o  $J \text{ s}^{-1}$ . La **densidad de flujo** a través de una superficie, se expresa entonces en  $W \text{ m}^{-2}$ , es decir,  $J \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Para un invernadero, es habitual expresar los flujos energéticos (aportes o salidas) con respecto a la superficie de suelo del invernadero y, a veces, respecto a la superficie de las paredes.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = C_T \frac{\Delta T}{\Delta t} = \Sigma \phi_{T_{in}} - \Sigma \phi_{T_{out}} \quad (10)$$

Si consideramos, como ejemplo, el balance de energía de un volumen  $V$  ( $m^3$ ) de aire, con una densidad  $\rho$  ( $kg\ m^{-3}$ ), la variación temporal de su temperatura ( $\Delta T_a$ ) es:

$$\rho V C_p \frac{\Delta T_a}{\Delta t} = \Sigma \phi_{T_{in}} - \Sigma \phi_{T_{out}} \quad (11)$$

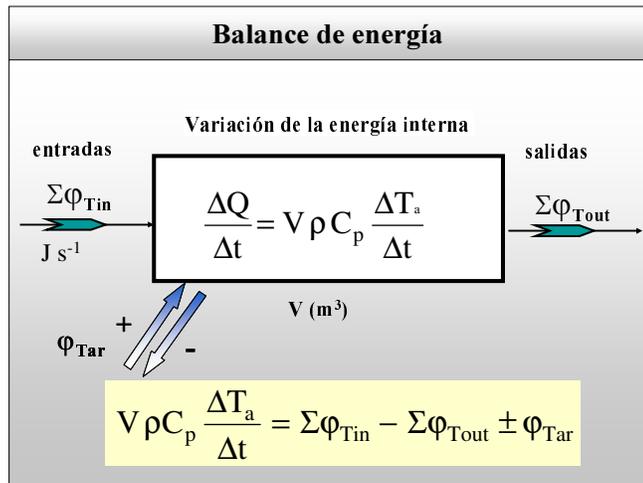
siendo  $C_p$  ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ) la capacidad térmica másica o calor específico, es decir, la capacidad térmica  $C_T$  por unidad de masa.

*Se deduce (Ecn. 11) que la variación de la temperatura del volumen de aire está directamente ligada a la diferencia entre los aportes y las pérdidas de energía. Cuando la ganancia de energía es superior a las pérdidas la temperatura aumenta. En el caso contrario, la temperatura disminuye.*

Cuando se aporta, o bien se extrae, del volumen considerado una determinada cantidad de energía por unidad de tiempo  $\phi_{Tar}$  (por ejemplo, cuando se aporta energía a través de un sistema de calefacción), la ecuación anterior se expresa (Figura 4):

$$V \rho C_p \frac{\Delta T_a}{\Delta t} = \Sigma \phi_{T_{in}} - \Sigma \phi_{T_{out}} \pm \phi_{Tar} \quad (12)$$

En los flujos que entran y salen de un elemento pueden estar implicados uno o varios mecanismos de transferencia (conducción, convección, radiación, Apartado 5), por lo que su conocimiento es necesario para establecer el balance de energía.



**Figura 4.** Componentes del balance de energía de un elemento:

- $\Delta Q/\Delta t$  = variación de energía por unidad de tiempo
- $\Delta \phi_{T_{in}}, \Sigma \phi_{T_{out}}$  = suma de los flujos energéticos que recibe y pierde el volumen  $V$ , respectivamente
- $\phi_{Tar}$  = flujo energético que se aporta o bien se extrae del volumen  $V$ .

#### 4. BALANCE DE MASA

Se pueden aplicar las mismas consideraciones a la transferencia de masa ( $M$ = vapor de agua o  $CO_2$ ) que interviene entre las componentes del invernadero y el aire. El principio **de conservación de la masa** establece que la cantidad de masa almacenada ( $\Delta M$ , g) por

unidad de tiempo ( $\Delta t$ ) es igual a la diferencia entre la suma de los aportes ( $\Sigma\phi_{Min}$ ) y la suma de las pérdidas de masa ( $\Sigma\phi_{M,out}$ ), y se expresa mediante un balance de masa:

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \Sigma\phi_{Min} - \Sigma\phi_{Mout} \quad (13)$$

con el flujo másico ( $\phi_M$ ) expresado en  $g\ s^{-1}$ .

La cantidad de masa puede expresarse en función de la densidad del aire,  $\rho$ , y de la concentración de la masa en el aire ( $q_M$ ,  $g\ kg^{-1}$ ):

$$\Delta M = \rho\ V\ \Delta q_M \quad (14)$$

Por analogía con la ecuación del balance de energía, si consideramos el flujo de masa de un volumen de aire  $V$ , el balance se expresa:

$$\rho\ V\ \frac{\Delta q_M}{\Delta t} = \Sigma\phi_{Min} - \Sigma\phi_{Mout} \quad (15)$$

Se deduce que el contenido de la masa en el aire aumenta cuando, en el intervalo  $\Delta t$ , la suma de los flujos de masa que entran ( $\Sigma\phi_{Min}$ ) es superior a la suma de los flujos de masa que salen ( $\phi_{Mout}$ ) del volumen de aire.

## 5. FLUJOS DE ENERGÍA Y DE MASA QUE ENTRAN Y SALEN DEL INVERNADERO

Durante el día, la **radiación solar** ( $G$ ) es la principal fuente de entrada energética del invernadero, representando la radiación neta al interior del invernadero entre un 70-80 % de la radiación global solar. La mayor parte de la energía es absorbida por las plantas y una pequeña parte es absorbida por el suelo y las estructuras del invernadero. A continuación se dan varios ejemplos que tienen como objeto recalcar los flujos implicados en el balance de energía de una superficie (ya sea vegetal o no) y de un volumen de aire

### 5.1- BALANCE DE ENERGÍA A NIVEL DE UNA SUPERFICIE

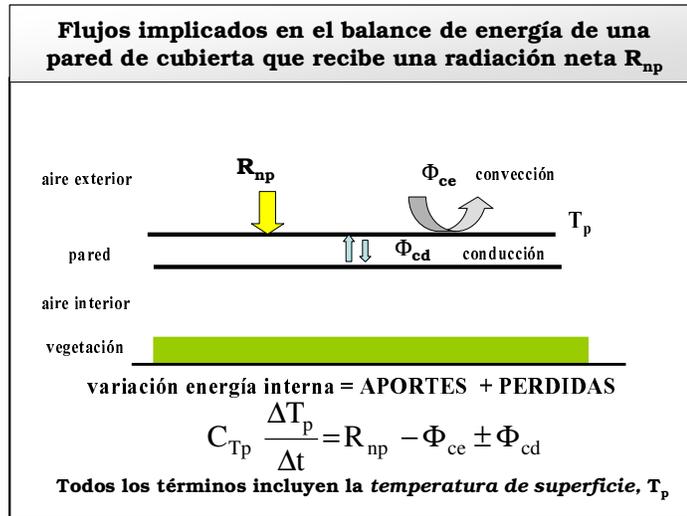
La temperatura de una superficie es la resultante del balance de energía y se ajusta continuamente de manera a alcanzar un equilibrio entre la energía absorbida,  $R_n$ , y las pérdidas energéticas. La radiación neta disponible a nivel de una superficie puede disiparse a través de uno o varios mecanismos de transferencia. En lo que sigue se presenta un ejemplo para el caso de una pared de cubierta y una vegetación.

Si consideramos el caso de una pared de cubierta, con una capacidad térmica  $C_{Tp}$  ( $J\ m^{-2}\ K^{-1}$ ), el balance de energía de la pared externa, se escribe, expresando los flujos por unidad de superficie (Figura 5):

$$C_{Tp}\ \frac{\Delta T_p}{\Delta t} = R_{np} - \Phi_{ce} \pm \Phi_{cd}$$

Si consideramos un elemento de vegetación ubicado sobre el suelo (Figura 6), con una capacidad térmica  $C_{Tv}$  ( $J m^{-2} K^{-1}$ ), la diferencia esencial con el balance de la pared estriba en que parte de la energía disponible a nivel de la vegetación se disipa a través del proceso de transpiración, proceso a partir del cual la planta regula su temperatura. En este caso, el balance de energía, despreciando la energía química almacenada en los productos derivados del proceso fotosintético:

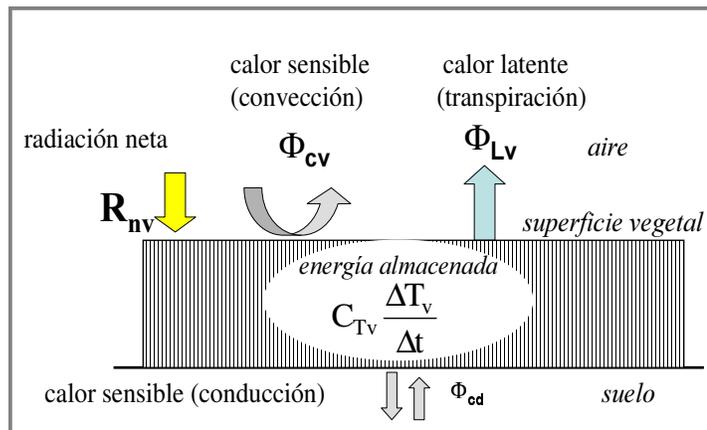
$$C_{Tv} \frac{\Delta T_v}{\Delta t} = R_{nv} - \Phi_{cv} \pm \Phi_{cd} - \Phi_{Lv} \quad (16)$$



**Figura 5.** Representación esquemática del balance de energía de una pared de cubierta.  $R_{np}$  = radiación neta de la pared exterior, con  $\Phi_{ce}$  y  $\Phi_{cd}$  en  $W m^{-2}$ , siendo  $C_{Tp}$  la capacidad térmica de la pared por unidad de superficie ( $J m^{-2} K^{-1}$ ).

Las pérdidas energéticas corresponden a:

- Flujo de calor sensible total que intercambia el vegetal por convección con el aire,  $\Phi_{cv}$ , y por conducción con el suelo,  $\Phi_{cd}$
- Flujo de vapor de agua disipado por transpiración,  $\Phi_{Lv}$



**Figura 6.** Balance de energía de una superficie vegetal:  $R_{nv}$  = radiación neta disponible,  $\Phi_{cv}$  y  $\Phi_{cd}$  = flujo de calor sensible por convección con el aire y por conducción con el suelo, respectivamente,  $\Phi_{Lv}$  = equivalente energético del flujo de transpiración,  $C_{Tv} \Delta T_v / \Delta t$  = energía asociada a los cambios de temperatura del vegetal.

El término preponderante en la ecuación (16) es  $R_{nv}$ . Si se considera despreciable el flujo de calor en el suelo (caso de un vegetal desarrollado) y la energía asociada a los cambios de temperatura del vegetal, se obtiene la ecuación combinatoria:

$$R_{nv} = \Phi_{cv} + \Phi_{Lvs} \quad (17)$$

a partir de la cual se deduce que los principales sumideros de la energía radiante disponible a nivel de una superficie son el proceso de transpiración y los intercambios por calor sensible con el aire.

A partir de la ecuación (17) se puede estudiar la influencia que ejerce el medio ambiente sobre la temperatura de superficie vegetal. Si consideramos el caso de una planta en condiciones de estrés severo que a penas transpira durante del día,  $\Phi_{Lvs} \approx 0$ , entonces:

$$R_{nv} = Q_{cv}$$

El flujo de transferencia por convección  $Q_{cv}$  se puede expresar por analogía con la ley de Ohm:

$$Q_{cv} = \frac{T_v - T_a}{r_{cv}}$$

siendo  $T_v$  la temperatura de superficie de la vegetación y  $T_a$  la temperatura del aire del invernadero,  $r_{cv}$  la resistencia a la transferencia de calor por convección ( $m^2 K W^{-1}$ ).

Utilizando la inversa de la resistencia, es decir el coeficiente de transferencia de calor  $h_{cv} = 1/r_{cv}$  ( $W m^{-2} K^{-1}$ ), obtenemos:

$$R_n = Q_{cv} = h_{cv} (T_v - T_a)$$

*La planta mantendrá la temperatura de superficie a un nivel en el que el aporte de energía por convección (aire-planta) compense la ganancia de radiación neta. Dado que, durante el día,  $R_n$  es positivo, esto implica que  $T_v > T_a$ . Por lo tanto, la temperatura de una superficie vegetal que no transpira (condiciones de estrés) será superior a la temperatura del aire durante el día. Se deduce de la ecuación anterior que, bajo condiciones de fuerte estrés:*

- *Un aumento de la radiación solar (es decir, un aumento de  $R_n$ ) resultará en un aumento de la temperatura del vegetal.*
- *Un aumento de las condiciones de convección bajo invernadero (es decir, un aumento de  $h_{cv}$  inducido por un aumento de la tasa de ventilación), conllevará una **reducción de la temperatura del vegetal.***

## 5.2- BALANCE DE ENERGÍA DEL VOLUMEN DE AIRE

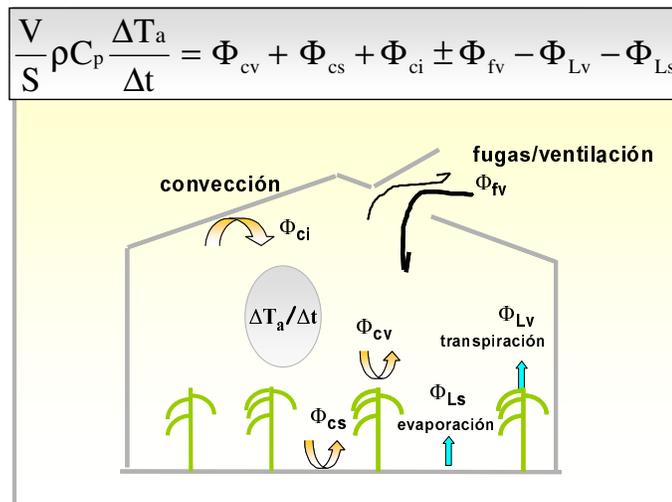
La temperatura del aire,  $T_a$ , varía debido a los procesos de convección entre el aire y los elementos del invernadero (paredes, suelo, dosel vegetal) y, eventualmente, entre el aire y los componentes del sistema de climatización (Figura 7). Por consiguiente, la variación temporal de la temperatura del aire interior dependerá de:

- La transferencia de energía por convección entre el aire y las plantas,  $\Phi_{cv}$ , entre el aire y el suelo,  $\Phi_{cs}$ , y entre el aire y la pared,  $\Phi_{ci}$ .

- Los intercambios de energía con el aire exterior a través de las fugas y de la ventilación,  $\Phi_{fv}$ .
- La fracción de energía sensible que se convierte en latente a través del proceso de evaporación del suelo,  $\Phi_{Ls}$ , y de transpiración de las plantas  $\Phi_{Lv}$ .

Expresando los intercambios en densidad de flujo,  $\Phi$  ( $W m^{-2}$ ), con respecto a la superficie  $S$  ( $m^2$ ) del invernadero, obtenemos el balance de energía del aire del invernadero:

$$\frac{V}{S} \rho C_p \frac{\Delta T_a}{\Delta t} = \Phi_{cv} + \Phi_{cs} + \Phi_{cc} \pm \Phi_{fv} - \Phi_{Lv} - \Phi_{Ls} \quad (W m^{-2}) \quad (18)$$



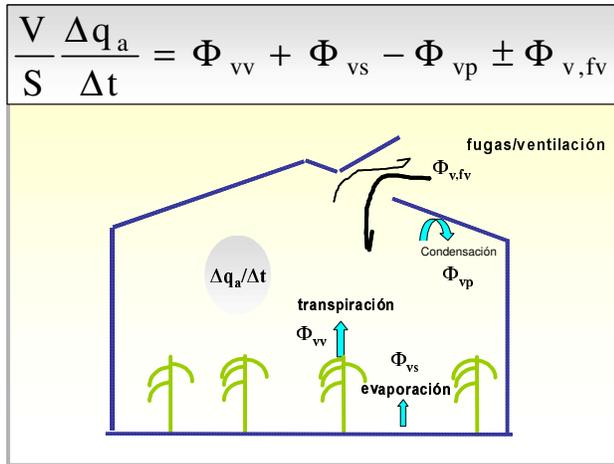
**Figura 7.** Balance de energía del aire. Representación esquemática de los flujos implicados en la variación temporal de la temperatura del aire.

### 5.3- BALANCE DE MASA DEL VOLUMEN DE AIRE

Se puede hacer el mismo tipo de razonamiento con respecto al balance de  $CO_2$  o el balance de vapor de agua del aire (Figura 8). Para el balance de vapor de agua, la variación de la humedad absoluta del aire ( $\Delta q_a$ ,  $g_{agua} kg^{-1} aire$ ) en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ ) depende de la diferencia entre los aportes de vapor de agua (transpiración y evaporación) y las pérdidas de vapor de agua por condensación. La ventilación puede actuar como una fuente o un sumidero de vapor de agua, aunque puede representar una pérdida de vapor de agua, debido a que, generalmente, se mezcla el aire interior (más caliente y húmedo) con el aire exterior (más frío y seco).

Si consideramos la evaporación del suelo despreciable (p.e.: suelo con acolchado de plástico), y expresamos los intercambios en densidad de flujo de masa ( $\Phi_v$ ,  $g m^{-2} s^{-1}$ ) con respecto a la superficie  $S$  ( $m^2$ ) del invernadero, obtenemos el balance de masa del aire:

$$\rho \frac{V}{S} \frac{\Delta q_a}{\Delta t} = \Phi_{vv} + \Phi_{vs} - \Phi_{vp} \pm \Phi_{v,fv} \quad (19)$$



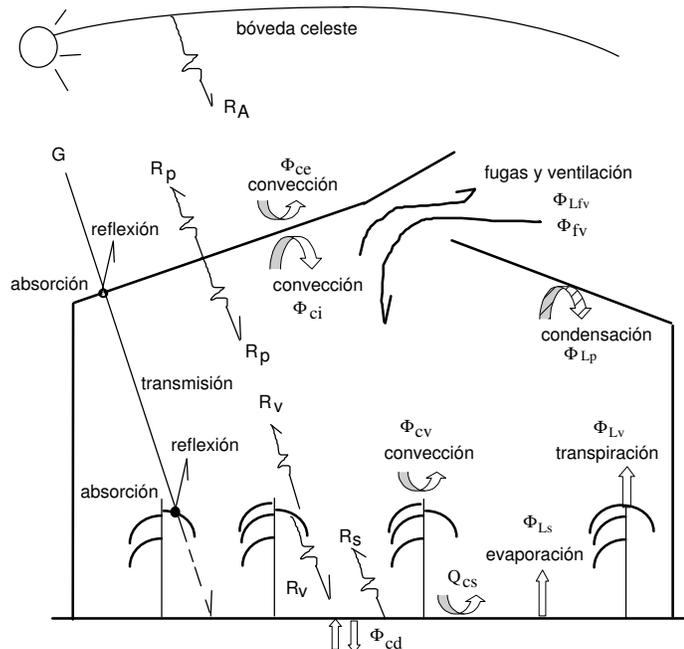
**Figura 8.** Balance de vapor de agua del aire. Representación esquemática de los flujos implicados en la variación temporal de la humedad absoluta del aire.

La Figura 9 muestra un esquema general de los flujos de energía y de masa que entran y salen de un invernadero. Se puede decir en resumen que:

(i) Los *procesos de transferencia de energía y de masa* (vapor de agua, CO<sub>2</sub>) que tienen lugar entre el vegetal y la atmósfera son los que determinan en gran parte:

- Las condiciones microclimáticas en las cercanías de las hojas.
- El microclima del volumen global del aire del invernadero, debido a que la pared de cubierta limita los intercambios de vapor de agua y de CO<sub>2</sub> con el medio exterior.

(ii) Los intercambios de energía y de masa entre el suelo y el aire, y entre el aire y la pared, ponen en juego procesos de **evaporación** y de **condensación**, los cuales van a influir de manera preponderante en la **temperatura** y la **humedad interior**.



**Figura 9.** Flujos de energía y de vapor de agua que entran y salen de un invernadero.

- Intercambios de energía radiante: Radiación solar, G, y radiación de longitud de onda larga, R (emitida por la atmósfera, R<sub>A</sub>; la pared, R<sub>p</sub>, la vegetación, R<sub>v</sub>, y el suelo, R<sub>s</sub>)
- Intercambio de energía por convección, Φ<sub>c</sub>; por fugas-ventilación Φ<sub>fv</sub>, por conducción, Φ<sub>cd</sub>.
- Equivalente energético de los intercambios de vapor de agua por fugas-ventilación (Φ<sub>Lfv</sub>), por condensación (Φ<sub>Lp</sub>) y por evapotranspiración (Φ<sub>Lv</sub> + Φ<sub>Ls</sub>).

Esto implica que, bajo invernadero, las condiciones que se crean en el medio aéreo vienen determinadas por un conjunto de intercambios de naturaleza **física** (evaporación del suelo, condensación) y **fisiológica** (transpiración, fotosíntesis y respiración del dosel vegetal). *Este último aspecto pone en relieve que no basta con cuantificar los procesos físicos que se establecen en invernadero, si no que es necesario también conocer y cuantificar el comportamiento fisiológico del cultivo (flujos de fotosíntesis, respiración, transpiración) respecto al clima. Para llevar a cabo un control óptimo de las principales variables climáticas, es necesario conocer y prever la importancia de estos procesos, así como sus interacciones con el clima interior.*