

A photograph of a large greenhouse filled with rows of cucumber plants. The plants are growing on white trellis nets, with their leaves and stems visible. The greenhouse structure, including the metal frame and translucent covering, is visible in the background.

TERMODINÁMICA EN INVERNADEROS

MC. Juan Pedro Corona Salazar
jpcorona@cucba.udg.mx

Termodinámico, ca. (De *termo-* y *dinámico*). adj. *Fís.* Perteneciente o relativo a la **termodinámica**. || **2.** f. Parte de la física en que se estudian las relaciones entre el calor y las restantes formas de energía.

Principios

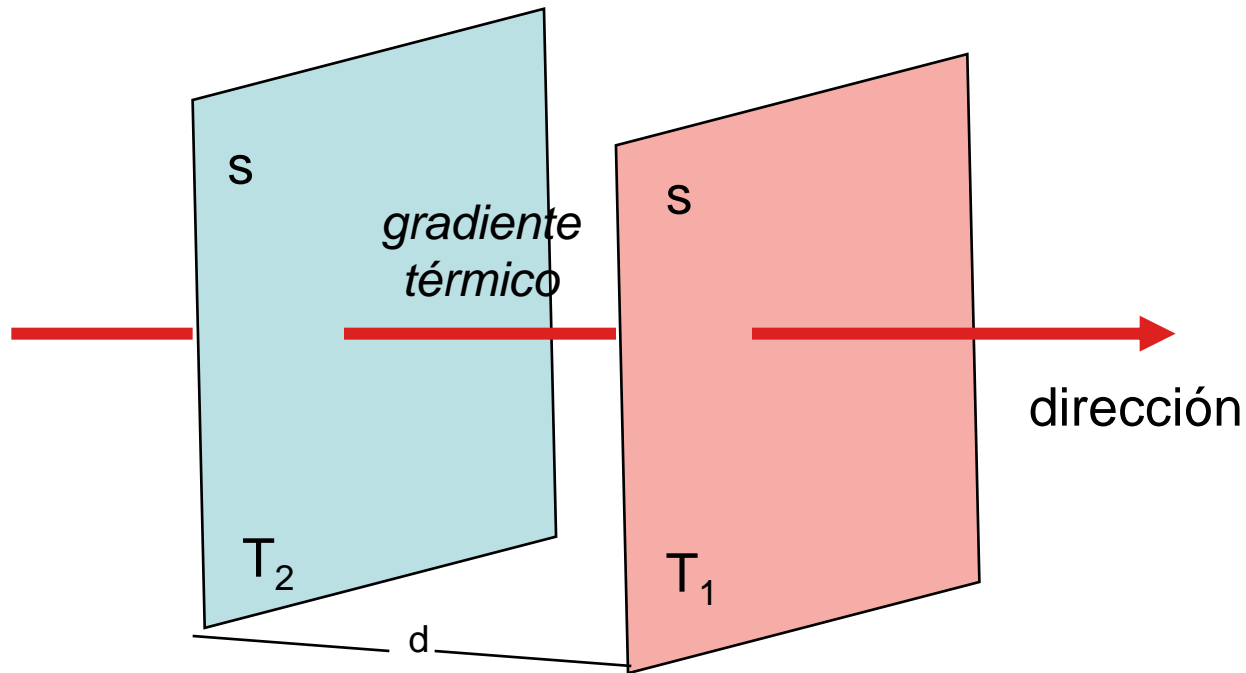
El primer principio es una ley de conservación de la energía. Afirma que, como la energía no puede crearse ni destruirse — dejando a un lado las posteriores ramificaciones de la equivalencia entre masa y energía — la cantidad de energía transferida a un sistema en forma de calor más la cantidad de energía transferida en forma de trabajo sobre el sistema debe ser igual al **aumento** de la energía interna del sistema.

El segundo principio de la termodinámica da una definición precisa de una propiedad llamada **entropía**. La entropía se puede considerar como una medida de lo próximo o no que se halla un sistema al equilibrio; también se puede considerar como una medida del desorden (espacial y térmico) del sistema.

MODOS DE INTERCAMBIO DE ENERGÍA

Conducción

Es el transporte de energía que se realiza de molécula en molécula dentro de un cuerpo ya sea sólido o fluido.



Mediante la conducción la energía se transporta a través de un medio en reposo, que no está fluyendo en la dirección de transporte de energía.

Convección

Es el transporte de energía por un fluido en la dirección del flujo o entre una superficie en reposo y un fluido. Los desplazamientos térmicos por convección implican el desplazamiento de materia, tienen lugar principalmente en fluidos e inducen su movimiento.



CONCEPTOS

- Hay tres modos fundamentales de intercambio de energía en forma de calor: la conducción, la radiación y la convección (con o sin cambio de estado).
- Mediante la conducción la energía se transporta a través de un medio en reposo. En invernadero son importantes los intercambios de calor por conducción entre la superficie del suelo y las capas profundas.
- Se denomina convección al transporte de energía por un fluido en la dirección del flujo, o entre una superficie en reposo y un fluido. Tiene gran importancia en invernadero: el aire junto a los tubos de calefacción se calienta por convección y recalienta las plantas, también por convección. La cubierta del invernadero intercambia calor con el aire exterior por convección, forzada cuando hace viento.

- La evaporación de agua consume mucha energía, al pasar del estado líquido al gaseoso. Se denomina «calor latente de vaporización» a la energía necesaria para evaporar 1 kg de agua, a 20° C y su valor es de 2.445 kJ por kg de agua evaporada. Si no hay cambio de estado (de líquido a vapor) el calor necesario para aumentar su temperatura 1° C (o calor específico del agua) es bajo, del orden de 4.2 kJ por kg de agua.
- La condensación del vapor de agua del aire es el fenómeno inverso a la evaporación y libera mucha energía. La condensación sólo se produce si la presión parcial del vapor de agua del aire alcanza un valor conocido como «presión de saturación».
- Se llama «punto de rocío» a la temperatura por debajo de la cual se produce la condensación.
- La transpiración de agua por las plantas es una forma particular de evaporación, que permite que las plantas se refrigeren y reduzcan su temperatura.
- La condensación de agua en un invernadero comienza por los puntos más fríos, normalmente la cubierta del invernadero.

TEMPERATURA CRÍTICAS PARA EL DESARROLLO VEGETATIVO DE ALGUNOS CULTIVOS

<i>Cultivo</i>	<i>T° mínima letal</i>	<i>T° máxima letal</i>	<i>T° mínima Biológica</i>	<i>T° máxima Biológica</i>	<i>T° óptima</i>
TOMATE	-2°	40°	10 a 12°	30°	20 a 24°
PIMIENTO	-1°	< 45°	13°	40°	18 a 25°
BERENJENA	0°	< 50°	10 a 12°	50°	18 a 27°
PEPINO	-1°	35°	10 a 12°	35°	18 a 25°
MELÓN	0 a 1°	35 a 40°	13 a 15°	25 a 30°	20 a 25°
SANDÍA	0°	45°	11 a 13°	30°	23 a 28°
CALABACÍN	-1°	< 40°	10°	35°	25 a 30°
FRIJOL	1 °	< 45°	8 a 10°	30 a 40°	18 a 30°
CHÍCHARO	-3 a -4°	< 40°	5 a 7°	35°	16 a 20°
LECHUGA	-6°	< 40°	6°	30°	15 a 20°
ACELGA	-5°	< 45°	5°	35°	18 a 22°
ESPINACA	-5°	40°	5 a 7°	25 a 30°	15 a 18°
APIO	0°	40°	8 a 10°	30°	18 a 25°
FRESA	-3 a -5°	40°	2 a 5°	30°	15 a 18°

Pérdidas de calor a través de la cubierta

Agrupamos las pérdidas de calor por conducción-convección y la pérdida de energía por radiación infrarroja. El coeficiente que engloba estas pérdidas de calor se denomina *coeficiente general de pérdida de calor por superficie*, "*U*". El valor del mismo para varios materiales es el siguiente:

MATERIAL DE COBERTURA	Coeficiente U (W/m ² C)
Vidrio, cubierta simple	6,2
Vidrio, cubierta doble	4
Vidrio, cubierta triple	2,8
Polietileno simple	6,2
Polietileno doble	4
Polietileno térmico, doble capa	3,4

Estos coeficientes son modificados por factores ambientales, fundamentalmente la velocidad del viento. Algunos autores calculan el coeficiente U, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Vidrio simple: $U = 4,04 + 0,65 v \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$

Plástico simple: $U = 4,76 + 0,52 v \text{ "}$

Plástico doble: $U = 4,06 + 0,25 v \text{ "}$

siendo v la velocidad del viento en m s^{-1}

Si bien en la tabla anterior no se tiene en cuenta, es de destacar, que los materiales de cobertura ondulados (placas rígidas), al poseer una superficie de contacto superior, tienen una mayor pérdida por cobertura.

El uso de pantallas térmicas reduce significativamente la incidencia del viento sobre el coeficiente U.

Conociendo el coeficiente U, la pérdida de calor por cubierta, se calcula de acuerdo a la ecuación (1)

$$q_c = U A_c / A_s (T_i - T_o) \text{ W m}^{-2} \text{ (1)}$$

Donde: U = coeficiente general de pérdida de calor por superficie

A_c = Superficie cubierta

A_s = Superficie del suelo

$T_i - T_o$ = salto térmico

Pérdida de calor por infiltración de aire:

Estas pérdidas se deben a la falta de hermeticidad del invernadero. Se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_r = N V / A_s p C_p (T_i - T_o) W \text{ m}^{-2}$$

N = Renovaciones horarias de aire (h^{-1})

V = Volumen del invernadero (m^3)

A_s = Area de suelo cubierta (m^2)

p = Densidad del aire (kg m^{-3})

C_p = Calor específico del aire a presión cte. ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)

Las renovaciones horarias dependen del material de cobertura y el grado de conservación del mismo.

Simplificadamente, N se puede calcular de la siguiente manera:

Invernaderos de vidrio $N = 0,4 + 0,433 v$

Invernaderos plástico 1er año $N = 0,4 + 0,058 v$

Invernaderos plástico 2do año $N = 0,4 + 0,1 v$

donde v es la velocidad del viento en m/s.

La influencia del viento es muy importante. Algunos autores encontraron que de 0 a 20 km/h la pérdida por infiltración se triplica, pasando a representar del 10 al 50 % de las pérdidas totales de calor del invernadero.

En la siguiente tabla, se presenta el poder calorífico de los combustibles más comunes:

Combustible	Densidad (kg/l)	Poder calorífico
Gasolina	0.724	30290 Kj/l
Gas-oil	0.835	35570 Kj/l
Gas natural pobre		31640 Kj/m ³
Gas natural rico		36950 Kj/m ³
Butano	0,575	45850 Kj/kg
Propano	0,520	46060 Kj/kg

CALCULO DE LA TEMPERATURA INTERNA DEL INVERNADERO

El modelo basa los cálculos en el balance general de energía y el balance de vapor de agua. Se formulan 2 ecuaciones con dos incógnitas: variación de temperatura y variación de tensión de vapor. Además incorpora el sistema de refrigeración por aspersión de agua (neblina o "fogging")

$$n G_o - K_s \Delta T - K_l \Delta e - K_c \Delta T = 0$$

G_o = Radiación solar insidente (W/m^2)

n = Coeficiente de utilización de la energía solar. 0,65 para cubierta simple y 0,6 para cubierta doble.

K_s = Coeficiente de transmisión del calor para calor sensible ($W m^{-2} K^{-1}$)

K_l = Coeficiente de transmisión del calor para calor latente ($W m^{-2} Pa^{-1}$)

K_c = Pérdida de calor por material de cubierta. ($W m^{-2} K^{-1}$)

ΔT = Diferencia de temperatura externa e interna (K)

Δe = Diferencia de presión de vapor externa e interna (Pa).

BALANCE TÉRMICO

El balance térmico de un invernadero depende de las aportaciones y pérdidas de calor que se tenga, estas pérdidas se resumen en la fórmula siguiente:

$$Q = q + q' + q'' + q'''$$

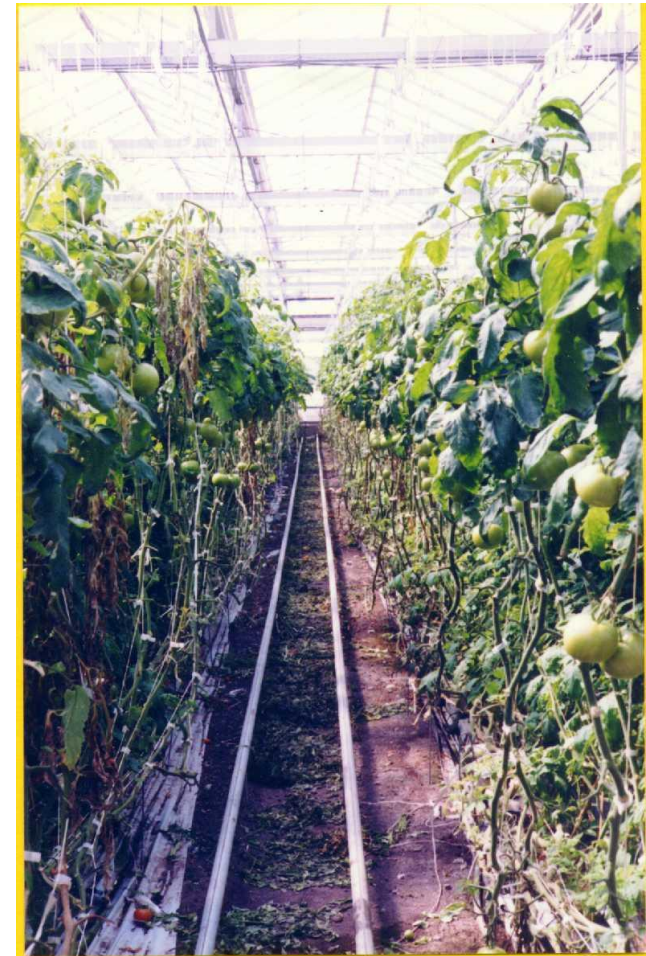
Donde:

q = pérdidas por conducción-convección

q' = pérdidas por renovación de aire

q'' = pérdidas por el suelo del invernadero

q''' = pérdidas por radiación a la atmósfera



Cálculo de

$$q = k \times S \times \Delta T$$

Vidrio 3 mm (aire en calma)	5.00 kcal/m ² /h/°C	k
Cloruro de polivinilo 3 mm	4.92 “	
Cloruro de polivinilo 1 mm	5.45 “	
Poliéster estratificado 1.2 mm	5.45 “	
Polietileno 0.08 mm (aire en calma)	5.50 “	
Polietileno 0.08 mm (aire en calma, doble pared)	2.60 “	

S = superficie de la cubierta

ΔT = salto térmico (diferencia entre el interior y el exterior del invernadero)

Cálculo de

$$q' = N \times V \times 0.307 \times \Delta T$$

N = número de renovaciones de aire del invernadero por hora

0.307 = calor específico del aire en (kcal/m³)

V = volúmen del invernadero en m³

ΔT = salto térmico (diferencia entre el interior y el exterior del invernadero)



Cálculo de

$$q'' = p \times S_{\text{suelo}} \times \Delta t' \text{ kcal/m}^2/\text{h}/^{\circ}\text{C}$$

p = coeficiente de conductividad térmica (media 1.8 kcal/m²/h/°C)

S_{suelo} = superficie del suelo

$\Delta t'$ = salto termico existente entre el suelo y el aire del invernadero



Cálculo de

$$q''' = 4.4 \times 10^{-8} \times A_g \times P(T_i^4 - T_e^4)$$

A_g = superficie radiante (suelo del invernadero en m^2)

P = coeficiente de permeabilidad e las radiaciones:

Polietileno.....0.80

Cloruro de vinilo.....0.30

Vidrio.....0.04

T_i = temperatura interna en valor absoluto

T_e = temperatura externa en valor absoluto



Balances de energía en el invernadero: Tienden a disminuir las pérdidas de calor del invernadero: *pérdidas por cobertura* (radiación de onda larga, conducción - convección) y por *renovación de aire*.

$$q_c = U A_c / A_s (T_i - T_o) \text{ W m}^{-2} (1)$$

U = Coeficiente de pérdida de calor por cobertura ($\text{W m}^{-2} \text{ C}$)

A_c = Area del material de cubierta (m^2)

A_s = Area de suelo cubierta por el invernadero (m^2)

T_i = Temperatura en el interior del invernadero (C)

T_o = Temperatura externa (C)

Coeficiente global de transmisión de calor (U en W.m².°C) para algunos materiales de cubierta de invernadero, medidos en condiciones normalizadas (temperaturas: exterior=-10°C, interior =+20°C, viento= 4m/s). Extractado de Nisen *et al.* (1986)

PARED		CIELO DESPEJADO	CIELO CUBIERTO
Simple	PE	8.8 - 9.0	7.1 - 7.2
	EVA	7.8	6.6
	PVC	7.6	6.4
	Poliéster	7.2	6.2
	Vidrio 4 mm	6.1	5.5
Doble	PE + PE	6.4	4.2
	PC (6 mm)	3.5	3.2
	Vidrio + vidrio	3.1	2.8

Ejemplo:

Se tiene un invernadero de cubierta de polietileno sencillo de 8 m de ancho X 30 m de largo = 240 m², en cielo despejado.

Area de material de cubierta (Ac) = 255 m²

Area de suelo cubierta por el invernadero (As) = 240 m²

Temperatura interna (Ti) = 30°C

Temperatura externa (To) = 25°C

$$q_c = U A_c / A_s (T_i - T_o) \text{ Wm}^{-2}$$

$$q_c = 8.8 \times 255 / 240 \times (30 - 25)$$

$$q_c = 8.8 \times 1.062 \times (5)$$

$$q_c = 46.728 \text{ Wm}^{-2}$$

- La relación A_c/A_s hace referencia a cuestiones de diseño de invernaderos. De acuerdo a esta relación, los módulos en batería, al disminuir esta relación, disminuyen las pérdidas de calor por cubierta, siendo más eficientes en la conservación de la energía que los **módulos individuales**, donde la proporción de paredes laterales es muy alta y aumentan la relación A_c/A_s .
- El coeficiente $(T_i - T_o)$, hace referencia al gradiente térmico que se quiere mantener. Cuanto mayor es este gradiente, más importancia tiene conocer las pérdidas de calor del invernadero para disminuir costos en calefacción.



Los sistemas de "técnicas de ahorro energético" más importantes son:

- 
- The image shows the interior of a large, modern greenhouse. The structure features a double roof with a translucent outer layer and a darker inner layer, supported by a complex metal framework. Rows of young plants in white trays are visible on both sides of a central aisle. The plants are supported by vertical white strings. The floor is made of dirt, and a long metal pipe runs along the left side. A semi-transparent yellow box is overlaid on the center of the image, containing a bulleted list of energy-saving techniques.
- **Pantallas térmicas**
 - **Doble techo**
 - **Cortavientos**
 - **Energía solar pasiva**

Las pantallas térmicas reducen el coeficiente de pérdida de calor por cobertura ("U") al aumentar la retención de radiación de onda larga (las aluminizadas en comparación con el polietileno pierden el 50 % menos de calor). Se prefieren materiales que no sean rígidos, con el fin de facilitar las operaciones de plegado.



Capacidad de sombra Shading capacity Capacité d'ombrage	Ahorro de energía Énergie saving Economie d'énergie
20%	50%
59%	65%
65%	70%
78%	75%
20%	45%
45%	52%
55%	58%
65%	63%
75%	68%
55%	20%
65%	25%
75%	30%
55%	
65%	
75%	
15%	45%
13%	45%
99,9%	78%
99,5%	78%
99%	78%
100%	80%

El doble techo consiste en instalar manualmente otra película de polietileno de 50-100 micrones de espesor separada unos centímetros de la cubierta principal. Se aconseja como separación óptima entre ambas capas unos 2 a 10 cm.

Si se aumenta la separación se aumentan las pérdidas por conducción-convección puesto que el aire confinado en la pared doble puede moverse con mayor libertad. La separación entre ambas láminas por medio de aire a presión es una variante mejorada del sistema anterior. El ahorro energético puede estimarse en un 30 % y la pérdida de luz en un 10 %.



Los cortavientos, precisamente, disminuyen la velocidad del viento, reduciendo las pérdidas de calor por renovación de aire y atenuando el aumento de "U" con el viento. Deben reunir algunas condiciones como son:

- 1. Permeabilidad**
- 2. Altura**
- 3. Homogeneidad**

La primera es debido a que el viento no debe ser detenido bruscamente como un muro, pues sino se origina a cierta distancia unos torbellinos peligrosos. Se estima que la mejor eficacia se alcanza con una permeabilidad del 50 %. La altura se debe tener presente porque se considera que la protección en horizontal que brinda es de unas 15-20 veces la altura de la cortina. La homogeneidad refiere a que para tener una buena protección, el cortaviento debe estar bien poblado desde la base a la extremidad, lo que lleva a menudo a utilizar varias especies (arbustos, coníferas, etc.).

La energía solar pasiva se refiere a la conversión de energía solar en energía térmica a través de:

- **Paneles solares ubicados en el exterior del invernadero**
- **Estructuras dentro del invernadero (colectores solares)**

Los colectores solares más simples son las mangas de polietileno transparente llenas de agua. Estas mangas se localizan en el suelo entre las filas del cultivo.

Por debajo de ellas se recomienda colocar un film de polietileno negro que absorbe la radiación solar contribuyendo al calentamiento del agua. Se aconseja como diámetro más adecuado de la manga alrededor de 30 cm, con polietileno transparente de 200-250 micrones, y conteniendo de 80 a 100 m³ de agua por 1000 m² de invernadero, debiéndose cubrir el 35 al 40 % de la superficie del invernadero.

CLIMATIZACIÓN EN PERÍODOS CÁLIDOS

El principal objetivo de disminuir las altas temperaturas, es lograr ampliar el período de utilización del invernadero. Los métodos más usados para lograr este objetivo son:

- * **Sombra artificial.**
- * **Ventilación natural.**
- * **Ventilación forzada.**
- * **Evaporación de agua.**

El sombreado artificial se puede obtener mediante la utilización de cal u otro material sobre la cubierta plástica o mediante la utilización de mallas de sombreado.

Es importante que estas mallas estén fuera del invernadero y no dentro, debido a que en esta última situación, la radiación es convertida en calor dentro del invernadero y debe eliminarse por ventilación. En cambio, la malla exterior se calienta, pero se refrigera con el aire exterior del invernadero.



EFFECTOS COMBINADOS DE DIFERENTES MALLAS DE
SOMBREO CON DOS SITUACIONES DE RENOVACIÓN DE
AIRE (VENTILACIÓN)

Tipo de sombreado	10 renovaciones/hora (temp. en grados centígrados)	40 renovaciones/hora (temp. en grados centígrados)
Malla aluminizada	30	27
Malla blanca	32	27
Malla negra	36	29
Sin malla	36	28

El sombreamiento, puede clasificarse en dos grupos:

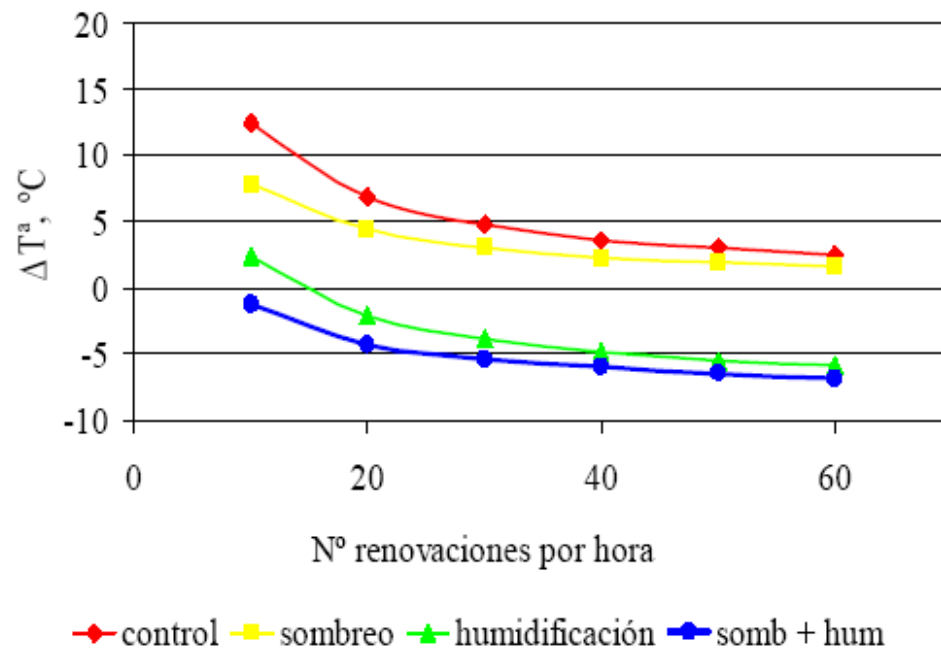
Sistemas estáticos

Los sistemas dinámicos



Con la ventilación, natural o forzada, lo que busca es conseguir una adecuada renovación del volumen de aire del invernadero (N), la cual debe ser de aproximadamente 40 renovaciones/hora. Estas renovaciones dependen de la superficie de ventanas y de la velocidad del viento.

Para el caso de ventilación forzada, la superficie de ventanas es la superficie ocupada por ventiladores y la velocidad del viento es fija y depende del diseño de los mismos.



N = Renovaciones horarias del invernadero, siendo

$$N = [z (S_o/2) C^{0.5} V] (3600 S_g / V_g)$$

z = Coeficiente aerodinámico (0.664)

S_o = Proporción de ventanas abiertas (m² m⁻² de invernadero)

C = Coeficiente de viento. (0.0867)

V = Velocidad del viento (m s⁻¹)

En cuanto a ventilación natural, la renovación del aire en el invernadero, tiene 2 fuerzas:

- Efecto estático: El movimiento de aire se da por una diferencia de presión consecuencia de una diferencia de temperatura entre el interior y exterior del invernadero. La superficie de ventanas juega un rol fundamental en la renovación de aire cuando interviene esta fuerza.
- Efecto viento: La velocidad del viento, mejora la renovación de aire del invernadero. El efecto del viento, supera al efecto estático, cuando la velocidad del mismo es mayor a 1m/s. De acuerdo a estudios recientes, no interesa la dirección del viento en la renovación de aire cuando la ventilación es cenital.

En el caso de *ventilación forzada*, el uso de ventiladores sobre el cultivo, mejoran el perfil térmico, disminuyendo el gradiente entre la base y la parte alta del invernadero. En cambio el efecto no es muy claro sobre la humedad. En cuanto al dióxido de carbono, la concentración disminuye con la altura, encontrándose diferencias de 60 ppm, reduciéndose a 30 con el uso de ventiladores

La velocidad del viento, generado por estos ventiladores no debe ser superior a 1m/s (3,6 km/h), debido a efectos sobre la planta como ser: reducción del área foliar, crecimiento y acumulación de materia seca, además de daños en las puntas y bordes de las hojas.



El enfriamiento por *evaporación de agua*, consiste en utilizar el calor latente de vaporización del agua para enfriar el invernadero.

Normalmente la cantidad de agua asperjada, no sobrepasa a 1 l/m^2 hora. Sin embargo, el dimensionamiento del sistema debe contemplar un funcionamiento rotativo (4 sectores aproximadamente) para evitar exceso de humedad y permitir el secado de la hoja.

El efecto producido por la evaporación de agua es similar al causado por la transpiración del cultivo.

