



PERFILES DE TEMPERATURA Y CIRCULACIÓN DE AIRE EN UN INVERNADERO MULTITÚNEL CON VENTILACIÓN FORZADA

Esteban J. Baeza
Bernard J. Bailey
Jerónimo J. Pérez-Parra
Juan C. Gázquez, Juan C. López

Se autoriza la reproducción íntegra o parcial
citando su procedencia: Estación Experimental de
Cajamar 'Las Palmerillas'

3^{er} Congreso Nacional de Agroingeniería
León – España
21 – 24 Septiembre 2005

Perfiles de temperatura y circulación de aire en un invernadero multitúnel con ventilación forzada

Esteban J. Baeza, Bernard J. Bailey¹, Jerónimo J. Pérez-Parra, Juan C. Gázquez, Juan C. López

Estación experimental Las Palmerillas Autovía del Mediterráneo km 416,7 El Ejido (Almería) 04710

ejbr@cajamar.es;

¹*Formerly at the Silsoe Research Institute, Wrest Park, Silsoe, Bedford MK45 4HS, UK*

bernard.bailey@whsmithnet.co.uk

Resumen. La ventilación mecánica es un complemento muy interesante para cubrir las necesidades de intercambio de aire en situaciones en las cuales la ventilación natural es insuficiente (ausencia de viento, elevados valores de humedad relativa, uso de mallas de baja porosidad, etc). Se obtuvieron los patrones de los flujos de aire generados en un invernadero dotado de ventilación mecánica mediante visualización de humo. Al mismo tiempo, se midieron perfiles de temperatura para diferentes configuraciones en las ventanas de entrada. Se observaron valores decrecientes de tasa de ventilación al incrementarse la suciedad de las mallas anti-insecto ubicadas en las entradas.

Palabras clave: ventilación forzada, invernadero, temperaturas, mallas.

Abstract. Fan ventilation is a very interesting complement to cover air exchange requirements under situations in which natural ventilation is insufficient (no wind, high relative humidity, low porosity screens, etc). Flow patterns generated in a fan ventilated multi-tunnel greenhouse were obtained using smoke visualisation. At the same time, temperature profiles were measured for different air inlet arrangements. Decreasing ventilation rates for different degrees of increasing dirtiness of the anti-insect screens located at the inlets were observed.

Keywords: fan ventilation, greenhouse, temperatures, screens.

Introducción

Los sistemas de ventilación mecánica en invernadero se erigen como un complemento muy interesante para cubrir las necesidades de ventilación en aquellos momentos en que la ventilación natural (ausencia de viento, elevados niveles de humedad invernales, colocación de mallas de baja porosidad, etc) resulta insuficiente. La ubicación de ventiladores por encima del cultivo para crear un adecuado flujo horizontal de aire en la zona del cultivo parece tener bastantes ventajas (Fernández y Bailey, 1994). Para un correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación mecánica es importante un adecuado diseño y dimensionado del sistema: número y capacidad de los ventiladores, ubicación en el invernadero de los puntos de entrada y salida de aire, corrección del área de entrada por colocación de mallas anti-insecto, etc. Estos aspectos son críticos, pues un mal diseño implica que los incrementos de temperatura, aunque sean pequeños, pueden reducir la cantidad y calidad de la cosecha (Willits, 2003). En un invernadero que cuenta con un sistema de ventilación mecánica es muy importante conocer el efecto que tiene sobre el clima interior y cuales son los movimientos de aire generados por el sistema. Los objetivos del presente trabajo son caracterizar parcialmente la influencia sobre el clima de un sistema de ventilación mecánica en un invernadero tipo multi-túnel midiendo los perfiles de temperatura en su interior generados así como la obtención cualitativa de los flujos de aire interiores para diferentes configuraciones de las ventanas de entrada.

Material y métodos

El invernadero y el sistema de ventilación mecánica se muestran en la Fig. 1. El invernadero experimental es un invernadero tipo multi-túnel de estructura metálica de tres capillas con su eje longitudinal orientado en dirección este-oeste y cubierto con film de polietileno. Sus dimensiones son: longitud 28 m, anchura de capilla 7,5 m, altura en cumbre 4,5 m y altura en canaleta 3m, longitud de cada sección 4 m.

Los ventiladores extractores presentan un diámetro de 1,3 m y están colocados en el centro de cada uno de los frontales de la parte este del invernadero con su base a la altura de la canaleta. Los

ventiladores son movidos por motores de 750 W mediante correas. Las salidas de los ventiladores presentan persianas "locas" que abren bajo la presión del aire creada por los extractores. El invernadero presenta tres ventanas de entrada de 2 m de alto por 1,3 m de ancho (área total de entrada 7,8 m²) enfrentadas a los extractores en el extremo oeste del invernadero. Cuando la ventilación está parada dichas ventanas permanecen cerradas gracias a unas lamas motorizadas. El invernadero presenta así mismo una ventana cenital de tipo continuo en la parte superior de cada capilla cubriendo ¼ del ancho de la capilla. Dichas ventanas abren y cierran mediante un sistema de cremallera motorizado y su apertura máxima es de 0,75 m. Además el invernadero presenta dos ventanas laterales de tipo enrollable en las bandas norte y sur de 1,5 m de alto. Todas las ventanas del invernadero presentan una malla anti-insecto de 20 x 10 hilos por cm con una porosidad del 39%. El cultivo estuvo formado por 13 líneas dobles dirección norte-sur de plantas de pepino con una línea simple a lo largo de la banda oeste que es la que presenta las ventanas de entrada. Las plantas se cultivaron en un sustrato de fibra de coco contenido en contenedores de poliestireno con riego por goteo para suministro de agua y fertilizantes.

Como se mencionó anteriormente, el área de las ventanas de entrada se incrementó de forma posterior para reducir la resistencia al flujo de aire provocada por la malla anti-insectos. Se colocó la malla en las 5 caras de un marco de 2 m de ancho, 1,3 m de alto y 1 m de profundidad colocados en las ventanas de entrada hacia la parte interior del invernadero.; esto incrementó el área de entrada en un factor de 3,5 y proporcionó un área total de entrada de 27,6 m². Cuando se realizaron los estudios de los flujos de aire con estas entradas modificadas, no había plantas en el invernadero.

Las temperaturas del aire se midieron a intervalos de 30 s empleando 5 psicrómetros colocados dentro de un recinto especialmente diseñado para prevenir que la luz incidiera directamente sobre los sensores, pero permitiendo la libre circulación del aire. Antes de utilizar los sensores en sus recintos protectores de radiación directa, estos fueron suspendidos a una altura de 1,5 m sobre el suelo en un recinto cerrado por paredes de obra y sin ventanas y sus medidas registradas durante un periodo de 24 h. Los registros mostraron que en el rango de temperatura de 14 a 27 °C, la desviación de los sensores individuales de la temperatura media fue de 0,1 °C.

Los flujos de aire fueron visualizados mediante la generación de humo blanco no tóxico producido por un generador Z1500 Series Antari. La unidad podía ser operada para proporcionar una salida de humo continua o por pulsos de duración ajustable así como la frecuencia de los pulsos de humo. Para poder visualizar los flujos en la parte superior del invernadero, se acopló una tubería rígida de PVC de 9 cm de diámetro para dirigir el humo hacia la región de interés. Para la visualización del flujo a niveles más bajos, el humo se emitía horizontalmente en una secuencia de pulsos cortos. Al ser pulsos de escasa duración su momento se disipaba con rapidez y el humo seguía el flujo de aire del invernadero. Los flujos visualizados eran observados y descritos mediante anotaciones in situ y algunos fueron grabados empleando una video cámara para estudiarlos con más detenimiento.

Las observaciones de los flujos de aire se realizaron con las siguientes ventanas de entrada de aire:

1. tres ventanas de entrada frontales a la misma altura en la parte superior de la pared oeste.
2. tres entradas extendidas de tipo cajón en la misma posición que en el punto 1.
3. tres ventanas cenitales a todo lo largo del invernadero.

Resultados y discusión

Las medidas de las temperaturas internas diurnas se realizaron en el periodo que fue del 4 de Mayo al 14 de Junio de 2002. Durante este periodo los 5 sensores de temperatura se utilizaron para medir las temperaturas en las direcciones este-oeste, norte-sur y en vertical estando el invernadero ventilado mediante los extractores y las ventanas frontales, las cenitales y la combinación de ambas. Las temperaturas registradas pusieron de manifiesto el gradiente longitudinal de temperaturas (las temperaturas tiende a subir a medida que nos acercamos a los extractores) que aparece con la configuración de ventanas frontales, desaparece si la apertura de éstas se combina con una apertura parcial de las ventanas cenitales longitudinales (Fig. 2). En la zona que está justo debajo de las ventanas frontales, cerca de la pared lateral, se observó una recirculación de aire lenta con bajo nivel de renovación. Como consecuencia, esta región no está bien ventilada y la temperatura cerca de la pared oeste que es la que presenta las ventanas de entrada, será más alta que donde el flujo de aire se extiende a toda la sección transversal del invernadero. Las zonas pobremente ventiladas debajo de las ventanas frontales se redujeron, aunque no desaparecieron, al reemplazar la ventana plana por la entrada en forma de cajón. El cajón proporcionaba un pequeño flujo de aire por su cara inferior horizontal que descendía hacia la región de debajo de la ventana. Este efecto sugiere que podrían eliminarse estas zonas pobremente ventiladas disponiendo una ventana continua a menor altura.

No se han realizado medidas de temperatura cuando el aire fluía desde las ventanas laterales continuas. Basándonos en las temperaturas obtenidas con la combinación de frontales y cenitales se sugiere que la temperatura aumentaría a lo largo de los caminos seguidos por los flujos de aire y por tanto las mayores temperaturas se producirían en la parte central de la pared este.

La distribución de temperaturas en la dirección norte-sur a lo largo del centro del invernadero no mostró grandes variaciones, Fig. 3. Había, sin embargo, evidencia de que el pasillo de la banda sur tenía cierta influencia sobre la temperatura. Al emplear las ventanas cenitales, el flujo de aire en la capilla sur difería del flujo en las otras capillas tal y como se describió previamente. Es probable que el pasillo de grava, calentado por la radiación solar, calentara el aire adyacente creando un movimiento ascendente de convección natural del aire. Este aire caliente se habría creado cualquiera que fuera el tipo de ventana de entrada empleada, y la Fig. 3 muestra las temperaturas mayores que aparecen cerca del pasillo tanto con las ventanas frontales como con su combinación con las cenitales. Los perfiles de temperatura verticales, Fig. 4, muestran que las temperaturas más bajas se producen entre el cultivo y las más elevadas en el espacio que está por encima del cultivo. Las temperaturas por encima del cultivo eran más bajas con las ventanas cenitales que con las frontales ya que las primeras introducían aire más frío a lo largo de todo el invernadero. El gradiente vertical de temperatura fue de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ con las ventanas cenitales.

La Fig. 5 representa la evolución de los valores de tasa de ventilación con los ventiladores funcionando al 100% de su capacidad, observándose como a medida que las mallas en las ventanas frontales de entrada iban acumulando suciedad, dichos valores se redujeron hasta un 33%. Con malla limpia, se obtuvieron tasas de ventilación cercanas a 30 renov./hora, mientras que al ensuciarse la malla, el valor bajó hasta unas 20 renov./hora, lo que demuestra que la limpieza de la malla es fundamental para mantener la eficiencia del sistema.

Se investigó el flujo de aire emergente desde la ventana norte (de la capilla más al norte) dirigiendo el vapor del generador hacia la ventana desde fuera del invernadero. Este ensayo reveló un flujo entrante uniforme en toda la superficie de la ventana. En el plano vertical, el chorro de entrada se expandía y alcanzaba la parte superior del cultivo a una distancia de unos 7 m desde la pared, Fig. 6. Una parte del aire era dirigida de nuevo hacia la pared oeste por las plantas creándose una zona de recirculación de aire debajo de la ventana con su eje a lo largo de la pared frontal. El aire en la parte central de chorro de aire entrante se movía fuertemente a través del espacio entre el techo y la parte superior del cultivo. En el plano horizontal el chorro de aire entrante se expandía en el invernadero alcanzando la canaleta a unos 7 m aproximadamente de la pared oeste, Fig. 7. Aparecieron regiones debajo y entre las ventanas cerca de la pared lateral oeste y en las esquinas del invernadero donde había un flujo secundario de recirculación y muy lento. La investigación previa fue repetida tras aumentar el área de entrada en las ventanas, pero sin plantas en el invernadero; los resultados se muestran en la Fig. 8. Debido al área de entrada de mayor tamaño la velocidad del aire entrante se redujo y, además, el aire penetró por los dos laterales y el fondo del cajón. Esto resultó en una mejor distribución de aire cerca de la pared oeste. También el aire por los laterales del cajón era dirigido hacia abajo por el techo y creó flujos más persistentes en las regiones de debajo y entre las ventanas.

El “chorro” de aire que emerge desde la ventana se expande a medida que el aire del invernadero es confinado en el perímetro de su sección transversal y este confinamiento también reduce la velocidad del aire en el perímetro del “chorro”. El “chorro” se expande verticalmente para rellenar la altura del invernadero y el aire que se mueve lentamente penetra en el cultivo y se mueve a través de las filas de plantas con un camino uniforme a lo largo del invernadero hacia los ventiladores. En la región que está justo debajo de las ventanas frontales, cerca de la pared lateral, hay una recirculación de aire lenta creada por el proceso de confinamiento. Como consecuencia esta región no está bien ventilada y la temperatura cerca de la pared oeste que es la que presenta las ventanas de entrada será más alta que donde el flujo de aire rellena la sección transversal completa del invernadero, como muestra la Figura 7.

Las zonas pobremente ventiladas debajo de las ventanas frontales se redujeron de tamaño, que no eliminadas, al reemplazar la ventana plana por la entrada en forma de cajón. El cajón proporcionaba un pequeño flujo de aire por su cara inferior horizontal que descendía hacia la región de debajo de la ventana. Para eliminar de forma completa estas zonas pobremente ventiladas, se necesitaría una ventana continua a menor altura.

Las ventanas individuales producen movimiento de aire pobre en el plano horizontal en las regiones entre los chorros en expansión antes de que se encuentre o encuentren las paredes del invernadero, como se muestra en la Figura 7. La distancia que estas regiones alcanzan en el invernadero crece a medida que crece la distancia entre las ventanas de entrada. Esto puede eliminarse usando una ventana continua.

En el primer ensayo, las ventanas cenitales del invernadero empleadas normalmente para la ventilación natural fueron abiertas aproximadamente 10 cm, proporcionando un área de entrada equivalente a la de las ventanas frontales sin modificar mediante el cajón. El flujo de aire a través de la ventana cenital de la capilla norte se determinó dirigiendo el vapor hacia la ventana desde el exterior del invernadero. El chorro de aire entrante se adhería a la parte inferior del alerón de la ventana y seguía la curvatura de la parte sur del techo de la capilla hasta alcanzar el cultivo bajo la canaleta, Fig. 9. El flujo entonces se dividía con una parte moviéndose hacia la región norte de la canaleta y parte hacia la región sur. En la capilla norte una pequeña recirculación de aire se creaba sobre la sección transversal de la capilla. En la capilla central, se producían dos recirculaciones, una débil en la parte norte y otra más fuerte en la parte sur. La circulación más fuerte era creada por el aire que entraba por la ventana cenital en dicha capilla. El aire recirculante avanzaba lentamente siguiendo un patrón del tipo sacacorchos a lo largo del invernadero hacia la pared este donde se encuentran los ventiladores extractores. El aire descendía hacia el suelo del invernadero en las líneas entre las filas de cultivo. En la capilla sur, se observó que el aire entrante no seguía adherido todo el arco del techo sino que descendía de forma irregular., Fig. 9, y había evidencias de aire ascendente sobre los 3 metros de anchura que tenía el pasillo de grava adyacente a la pared sur.

Posteriormente, cuando el invernadero no contaba ya con plantas, se investigó el efecto de incrementar la apertura de las ventanas cenitales. Los resultados se muestran en las Figuras 10 y 11. A medida que aumentaba la apertura de la ventana cenital, disminuía la velocidad de entrada del aire. Dada la mayor inclinación de la ventana, las corrientes de aire no se adherían a la parte interior del techo, sino que descendían de forma más directa al suelo de debajo de la ventana. El aire descendiente todavía se dividía en dos corrientes, una rotativa en el espacio debajo de la ventana y el otro más débil desplazándose hacia la capilla adyacente. Al contrario que cuando había un cultivo presente, el flujo en la capilla sur por encima del pasillo era similar al de las otras capillas. En la parte final del invernadero opuesta a donde están los ventiladores, el aire entrante se alejaba de la pared lateral a medida que descendía dejando una región pobremente ventilada en la base de la pared tal y como se observa en la Fig. 12. En la pared lateral donde estaban los ventiladores, solamente muy cerca de los mismos (2 a 4 m) el aire fluía directamente desde la ventana de entrada hacia los ventiladores. Más lejos de los mismos el aire descendía hacia el suelo pero en un plano inclinado hacia los ventiladores, Fig. 12.

Es norma general con la ventilación forzada que la entrada de aire este en un lateral del invernadero y los extractores en el opuesto, de forma que se producen gradientes de temperatura y humedad entre la entrada y el ventilador. Sin embargo, al abrir las ventanas cenitales, el aire exterior más frío y seco puede ser introducido a lo largo del camino del flujo interior reduciendo por tanto estos gradientes. Cuando se abrieron poco las ventanas cenitales, el aire penetró a gran velocidad y el flujo se adhería a la ventana y a la superficie interior del techo y era liberado de forma vertical justo debajo de la canaleta. El aire pasaba entonces por encima y por dentro del cultivo a ambos lados de la canaleta mezclándose con el aire que ya fluía a través de invernadero. A medida que la apertura en las ventanas era mayor, el aire entrante era más lento y descendía de forma más vertical. Sin embargo, incluso cuando las ventanas estaban completamente abiertas el aire aún descendía hacia el suelo del invernadero (vacío).

Debido a la forma de “sacacorchos” del flujo de aire creado por las ventanas cenitales hacia los extractores, el flujo de aire en la pared oeste era muy pobre, tal y como se muestra en la Figura 12. Esto resultó en la mayor temperatura cerca de esta pared lateral, como muestra la Figura 3. Al usar las ventanas frontales junto con las cenitales, el flujo de aire en esta región mejoraba (Fig. 12) y se eliminaba la región de alta temperatura (Fig. 3). La temperatura se volvía esencialmente uniforme a lo largo del invernadero.

El invernadero empleado para estos ensayos solo tenía 28 m de largo, por lo que no aparecieron grandes diferencias de temperatura a lo largo de la longitud del invernadero cuando se emplearon las ventanas frontales. Sin embargo, cuando se emplea la ventilación forzada en invernaderos con grandes distancias entre paredes laterales, el uso de las ventanas cenitales además de las incluidas en la pared lateral reducirá de forma sustancial los gradientes de temperatura y humedad que aparezcan. De forma teórica, cuando se emplean solo las ventanas cenitales no debería existir ningún cambio en la temperatura y la humedad a lo largo del invernadero. Para la misma tasa de ventilación, la temperatura a lo largo de un invernadero con ventanas cenitales debería ser la misma que la temperatura que la que hubiera al final del trayecto del aire de un invernadero que tuviera ventanas laterales y ventiladores en paredes opuestas.

Conclusiones

La configuración de ventanas frontales y extractores en la pared opuesta produjeron un aumento de temperatura a lo largo del invernadero de 0,14 °C/m con un cultivo de pepino. El gradiente de temperatura

a lo largo del invernadero fue eliminado al emplear las ventanas cenitales en combinación con las frontales. Cuando solo se empleaban ventanas cenitales, no se conseguía suficiente ventilación en la pared oeste. Esto pudo evitarse abriendo las ventanas frontales. Las temperaturas del aire fueron uniformes en la dirección vertical sobre el cultivo y descendieron dentro del cultivo con la combinación de ventanas frontales y cenitales. El flujo de aire fue uniforme hasta una distancia de 2 m de la pared de los ventiladores y no se halló influencia de la temperatura a 2 m de la pared. Usar ventanas frontales opuestas a los ventiladores junto con las ventanas cenitales debería permitir emplear la ventilación mecánica en invernaderos grandes en los cuales la distancia desde las ventanas de entrada a los ventiladores exceda de 30-40 m. Por otra parte, los resultados han puesto en evidencia la importancia de realizar una limpieza en las mallas de las ventanas de entrada si no se desea que disminuyan los valores de tasa de ventilación.

Bibliografía

Fernández, J.E.; Bailey, B.J. (1994) The influence of fans on environmental conditions in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. **58**, 201-210

Willits, D.H. (2003) Cooling fan-ventilated greenhouses: a modelling study. *Biosystems Engineering* **84**(3), 315-329

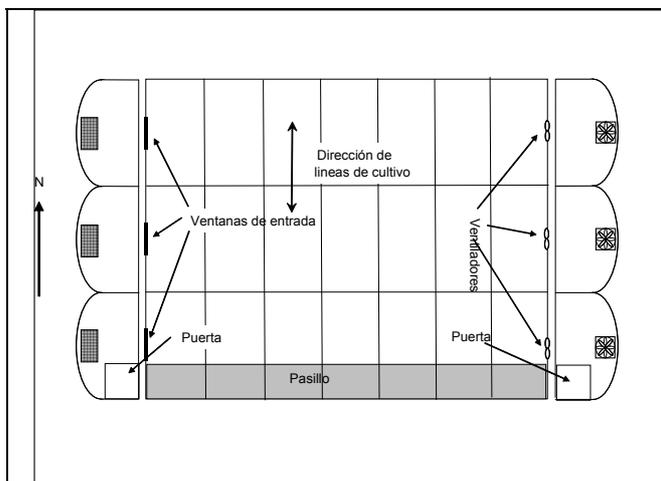


Figura 1. Esquema del invernadero experimental.

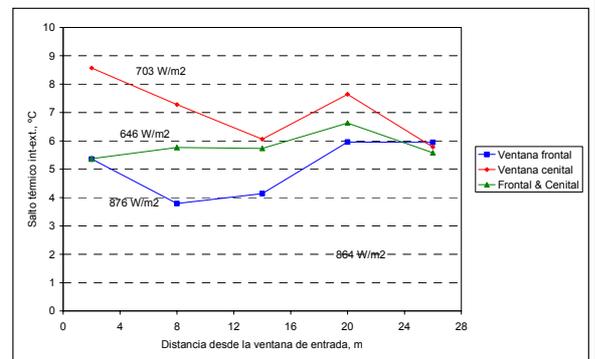


Figura 2. Salto térmico medido en la dirección este-oeste a lo largo de la capilla central a una altura de 1,3 m sobre el suelo.

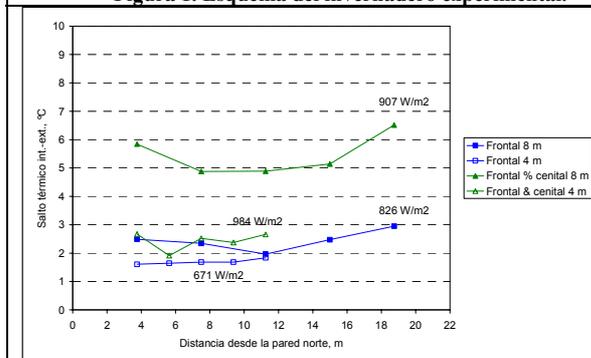


Figura 3. Salto térmico medido en la dirección N-S en el centro del invernadero a una altura de 1,3 m sobre el suelo, a 4 m y 8 m de la pared oeste.

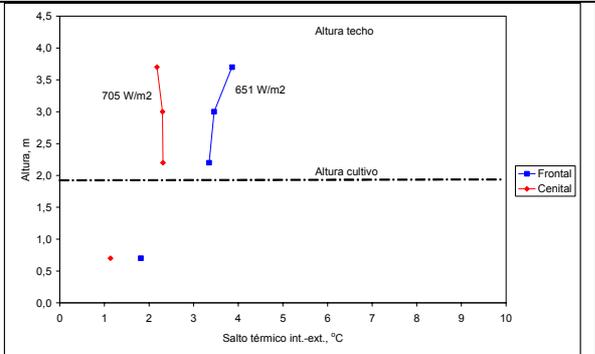
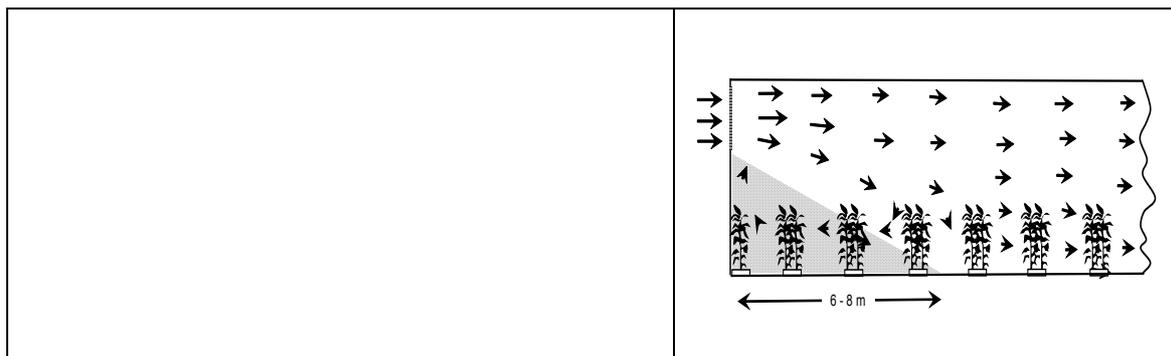


Figura 4. Perfiles verticales de temperatura en el centro del invernadero con las ventanas frontales o las cenitales.



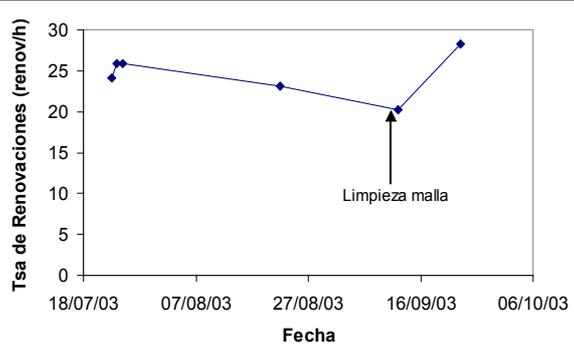


Fig 5. Evolución de los valores de tasa de ventilación al ensuciarse la malla y tras su limpieza.

Fig 6. Flujo de aire en el plano vertical a través del centro de la ventana frontal de la pared oeste, el área sombreada presenta un flujo de aire pobre.

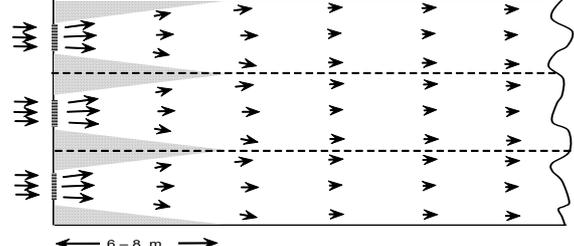


Fig 7. Flujo de aire en el plano horizontal a través del centro de las ventanas.

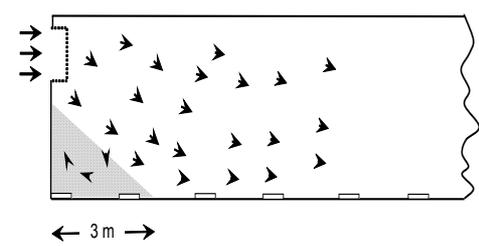


Fig 8. Flujo de aire en el plano vertical a través del centro de la entrada tipo cajón

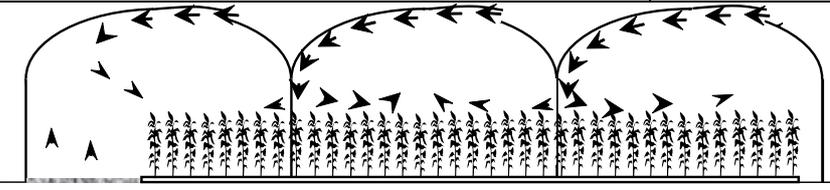


Fig 9. Flujos de aire producidos por las ventanas cenitales abiertas unos 10 cm.

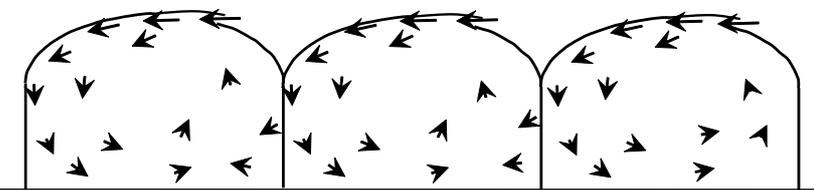


Fig 10. Flujos de aire producidos por las ventanas cenitales abiertas aproximadamente un 20% (15 cm).

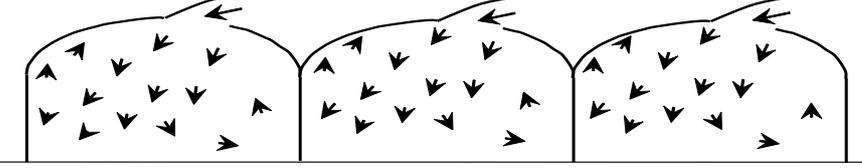


Fig 11. Flujos de aire producidos por las ventanas cenitales abiertas al 100% (75 cm).

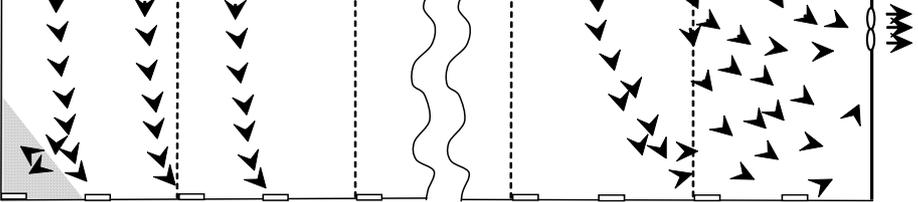


Fig 12. Flujos de aire verticales en los dos extremos este y oeste del invernadero con ventanas cenitales abiertas un 25% (20 cm).