



/ 01

Cuadernos de **Investigación**

Invernaderos con cubierta de plástico y cristal en el sureste español

Comparación entre un invernadero multitúnel
y otro venlo con cultivo de pimiento

Juan José Magán Cañadas

Ángeles Belén López Fernández

Jerónimo José Pérez Parra

Juan Carlos López Hernández

Cuadernos de **Investigación** /01

Invernaderos con cubierta de plástico y cristal en el sureste español

Comparación entre un invernadero multitúnel
y otro venlo con cultivo de pimiento

Juan José Magán Cañadas

Ángeles Belén López Fernández

Jerónimo José Pérez Parra

Juan Carlos López Hernández



Colección: CUADERNOS DE INVESTIGACIÓN

1. INVERNADEROS CON CUBIERTA DE PLÁSTICO Y CRISTAL EN EL SURESTE ESPAÑOL

© Fundación Cajamar

Autores: Juan José Magán Cañadas, Ángeles Belén López Fernández,
Jerónimo José Pérez Parra, Juan Carlos López Hernández

Edita: Fundación Cajamar

Imprime: Escobar Impresores, S.L. - El Ejido (Almería)

Depósito legal: AL-1229-2008

Índice

1. INTERÉS Y OBJETIVOS.....	5
2. MATERIAL Y MÉTODOS	9
2.1. Descripción del experimento.....	11
2.1.1. Localización.....	11
2.1.2. Tratamientos y diseño experimental.....	12
2.1.3. Descripción de los invernaderos	12
2.1.4. Material vegetal y técnicas culturales.....	13
2.1.5. Fertirrigación.....	14
2.1.6. Descripción y manejo de las instalaciones de climatización	15
2.1.6.1. Sistema de calefacción	15
2.1.6.2. Pantalla de ahorro energético.....	16
2.1.6.3. Pantalla de sombreado.....	17
2.1.6.4. Sistema de nebulización.....	18
2.1.6.5. Sistema de enriquecimiento carbónico.....	19
2.2. Determinaciones	20
2.2.1. Clima.....	20
2.2.2. Producción de fruto.....	21
2.2.3. Consumo de inputs	22
2.2.3.1. Consumo de agua.....	22
2.2.3.1.1. Absorción de agua por el cultivo	22
2.2.3.1.2. Consumo de agua por el sistema de nebulización	22
2.2.3.2. Consumo de fertilizantes.....	22

2.2.3.3. Consumo de anhídrido carbónico.....	22
2.2.3.4. Consumo de combustible.....	22
2.2.3.5. Consumo eléctrico.....	23
2.2.4. Estudio económico.....	23
2.2.5. Análisis estadístico.....	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
3.1. Clima.....	27
3.1.1. Temperatura del aire.....	27
3.1.2. Déficit de presión de vapor (DPV).....	28
3.1.3. Concentración de CO ₂	29
3.1.4. Radiación.....	31
3.2. Producción de fruto.....	33
3.2.1. Producción estacional.....	33
3.2.2. Producción no comercial.....	35
3.3. Consumo de insumos.....	36
3.3.1. Consumo de agua.....	36
3.3.1.1. Agua aportada en el riego.....	36
3.3.1.2. Agua aportada a través del sistema de nebulización...37	
3.3.2. Consumo eléctrico.....	38
3.3.3. Consumo de propano.....	39
3.3.4. Consumo de anhídrido carbónico.....	40
3.4. Estudio económico.....	40
4. CONCLUSIONES.....	45
5. BIBLIOGRAFÍA.....	49

INTERÉS Y OBJETIVOS

1

1 INTERÉS Y OBJETIVOS

La provincia de Almería constituye la principal zona de producción hortícola intensiva de España y una de las más importantes a nivel mundial, teniendo en la actualidad una superficie invernada de 27000 ha de invernaderos (Sanjuán, 2004) y un valor de la producción comercializada de hortalizas, durante la campaña 2006/07, de casi 2100 millones de euros (Consejería de Agricultura y Pesca, 2007). El modelo de producción almeriense se caracteriza por el empleo de estructuras de invernadero artesanales, de bajo coste, con cerramiento plástico y escaso control climático, denominadas parrales, las cuales representan más del 99% de los invernaderos (Pérez-Parra y Céspedes, 2001). El sistema productivo bajo estos invernaderos se basa, al igual que los desarrollados en otras zonas con inviernos relativamente suaves, en la utilización de un mínimo de energía, lo cual genera para la mayoría de las especies cultivadas unas condiciones microclimáticas subóptimas (Castilla, 1994). De esta forma, se trata de obtener una producción aceptable fuera de estación al menor coste posible aprovechando las bondades del clima, objetivo que difiere del perseguido en zonas más frías, como el centro de Europa, en donde las condiciones ambientales han obligado al uso de instalaciones de control climático de alto coste que permiten optimizar el clima del invernadero y alcanzar así elevadas productividades.

El sistema productivo almeriense ha experimentado un crecimiento sostenido desde sus orígenes, a pesar de que el precio unitario expresado en euros constantes había perdido en 2002 un 20% respecto al de 1975 (Molina, 2003). Esto ha resultado posible gracias al aumento en dicho periodo de la producción por unidad de superficie en un 200%, como consecuencia de la incorporación de diferentes aportaciones tecnológicas, tales como el riego por goteo, las nuevas variedades híbridas, los programadores de riego, el cultivo sin suelo, la mejora de las estructuras de invernadero, etc (Molina, 2003).

Sin embargo, en la actualidad la horticultura almeriense se está enfrentando a diversos retos, como son, principalmente, la entrada en competencia de nuevas zonas productoras en los mercados internacionales y la concentración de la demanda. Ante ello, parece ne-

cesaría una mejora de la comercialización a través de la concentración y la continuidad de la oferta, la diversificación de los productos ofrecidos, etc. Asimismo, otro aspecto en el que será necesario seguir incidiendo será el aumento de la productividad a través de la incorporación de nuevas mejoras tecnológicas. En este sentido, un mayor control del clima del invernadero puede tener un gran interés, dado que es un aspecto en el que hasta el momento apenas se ha incidido en el sistema productivo almeriense y que tiene un gran efecto sobre el cultivo.

El uso de diversos equipamientos de control climático, tales como sistemas de calefacción, pantallas aluminizadas, nebulización o enriquecimiento carbónico, además de inducir un aumento de la producción y la calidad de ésta, permiten ampliar el periodo productivo. Sin embargo, los típicos invernaderos parrales existentes en la zona frecuentemente no permiten la incorporación eficiente de dichos equipamientos, por lo que se plantea la necesidad de utilizar estructuras más herméticas que puedan cobijar con éxito los dispositivos de control climático y que se adapten a las condiciones imperantes en el área mediterránea. En este sentido, una opción factible son los invernaderos multitúneles con cerramiento a base de plástico tensado y cubierta curva, los cuales han sido utilizados en la zona principalmente en semilleros debido a su mayor nivel tecnológico, aunque en los últimos años se empiezan a ver en explotaciones comerciales de hortalizas. Una alternativa a estos invernaderos es la constituida por aquéllos que utilizan el cristal como elemento de cerramiento (venlo), los cuales son característicos de zonas más frías. La instalación de estos invernaderos es muy escasa en el área mediterránea por la alta inversión que requieren aunque, debido a los altos rendimientos productivos que llegan a alcanzar en zonas frías, tiene interés evaluarlos en condiciones cálidas.

En este contexto se plantea la realización de un ensayo comparativo entre las dos estructuras de invernadero anteriormente indicadas (multitúnel con cubierta de plástico tensado y venlo con cerramiento de cristal), ambas dotadas con los mismos dispositivos de control climático, los cuales participarán de forma activa en la modificación del microclima, con el fin de conocer su nivel de eficiencia en áreas cálidas.

El objetivo general del experimento es realizar una comparación tanto agronómica como económica entre los dos sistemas productivos propuestos. Para ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la influencia de ambas estructuras sobre los principales parámetros microclimáticos determinantes de la producción (temperatura, déficit de presión de vapor, concentración de anhídrido carbónico y radiación).
- Determinar el comportamiento agronómico de un cultivo de pimiento tipo California en cada invernadero.
- Realizar un estudio económico comparativo entre ambos sistemas productivos.

MATERIAL Y MÉTODOS

2



2 MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

2.1.1. Localización

El experimento fue llevado a cabo en la Estación Experimental de la Fundación de Cajamar (Fotografía 2.1), ubicada en el término municipal de El Ejido (Almería), durante la campaña 2005/2006.



Fotografía 2.1 Vista aérea de la Estación Experimental de la Fundación de Cajamar. Los números señalan los invernaderos empleados en el ensayo (1, invernadero tipo venlo; 2, invernadero tipo multitúnel).

2.1.2. Tratamientos y diseño experimental

Se realizó una comparación entre dos estructuras de invernadero diferentes, estudiándose el comportamiento de un cultivo de pimiento (*Capsicum annum L.*) en cada una de ellas. Cada tratamiento se correspondió con un invernadero, habiendo por tanto dos tratamientos, que fueron:

T1: invernadero tipo venlo

T2: invernadero multitúnel de arco gótico

Los datos medidos de productividad del cultivo se analizaron considerando que el ensayo tenía un diseño unifactorial, cuyo único factor fue el tipo de estructura, con dos tratamientos que se correspondieron con cada uno de los invernaderos. Dentro de éstos se tomaron cuatro repeticiones, procurando que estuvieran ubicadas en la parte central de las líneas de cultivo y que hubiera al menos varias líneas más hasta el frontal del invernadero para evitar el efecto borde.

2.1.3. Descripción de los invernaderos

Para la realización del ensayo se emplearon dos invernaderos multicapilla diferentes (Fotografía 2.2), ambos con unas dimensiones de 40 x 24 m. Por un lado, un invernadero tipo venlo con cubierta de cristal de 4 mm de espesor, con una termicidad próxima al 0% (absorción del 100%) y una transmisividad a la luz visible del 90-92%, y, por otro, un invernadero multitúnel de arco gótico con cubierta de plástico tricapa (TRIPLAST®) de segunda campaña de 200 µm de espesor, con una termicidad inferior al 25% y una transmisividad a la luz visible del 86%.

El invernadero tipo venlo constaba de 6 capillas de 4 m de anchura cada una, y presentaba una altura al canalón de 4,7 m, siendo ésta a la cumbre de 5,5 m. Por su parte, el inver-



Fotografía 2.2 Vista exterior de los invernaderos comparados. A la izquierda, invernadero tipo venlo. A la derecha, invernadero multitúnel de arco gótico.

nadero multitúnel constaba de 3 capillas de 8 m de anchura cada una, con una altura al canalón de 4 m y de 6 m a la cumbre. En ambos invernaderos las capillas se disponían en dirección este-oeste. Sin embargo, los ángulos de cubierta eran diferentes entre sí, de forma que en el invernadero venlo era de unos 22°, mientras que en el multitúnel el ángulo medio era de unos 27°.

Ambos invernaderos disponían de ventanas cenitales automatizadas en cada capilla, las cuales estaban provistas de malla anti-insectos de 20 x 10 hilos cm⁻². En el multitúnel cada capilla poseía dos ventanas abatibles supercénit que se extendían a lo largo de toda ella y que estaban orientadas una al norte y otra al sur. Asimismo existía una ventana lateral enrollable en cada una de las bandas norte y sur, de modo que la superficie de ventilación cenital y lateral era del 28,6 y 8,7% respectivamente de la superficie del invernadero. En el invernadero tipo venlo cada capilla estaba provista de 9 ventanas abatibles de 2,94 m de longitud orientadas de forma alterna al norte y al sur. Además, en ambos extremos de cada capilla existía una ventana abatible de 1,31 m de longitud orientada al sur, siendo la superficie de ventilación total del 13,4% con respecto a la superficie del invernadero.

2.1.4. Material vegetal y técnicas culturales

El material vegetal empleado en el ensayo fue pimiento (*Capsicum annum* L.) cultivar Zamboni. Este cultivar es un pimiento tipo California de maduración en rojo que produce frutos de gran calidad y tamaño y que, a su vez, es muy exigente en temperatura y radiación para su correcto desarrollo, por lo que no está implantada en los sistemas de cultivo bajo invernadero tradicionales de Almería. Sin embargo, ha dado buenos resultados en invernaderos con control climático del Sureste peninsular.



Fotografía 2.3 Disposición de las plántulas de pimiento tras el trasplante.

El trasplante se realizó el 23 de septiembre de 2005 y el ciclo de cultivo finalizó el 19 de junio de 2006, 269 días después del trasplante (DDT). El medio de cultivo utilizado fue perlita tipo B-12 de primer año, contenida en sacos de polietileno bicolor de 33 L de capacidad. El cultivo se distribuyó en líneas pareadas dispuestas cada 2 m y la separación entre plantas dentro de una fila era 0,3 m (Fotografía 2.3), lo que determinó una densidad de plantación de 3,33 plantas m⁻².



Fotografía 2.4 Vista del cultivo en los invernaderos venlo (izquierda) y multitúnel (derecha) al final del experimento.

El sistema de entutorado utilizado fue el denominado "vertical u holandés". Se dejaron dos tallos principales por planta (6,67 tallos m^{-2}), cada uno de los cuales se fue liando sobre un hilo vertical de rafia. Para favorecer un mayor crecimiento vegetativo inicial, se eliminaron las flores de la cruz de la planta, así como las del primer y segundo nudos de cada tallo principal. Hasta el quinto nudo se eliminaron totalmente los tallos secundarios y, a partir de ese nudo, se podaron dejando una sola hoja. En primavera, se dejaron dos o incluso tres hojas por cada brote lateral, con el objetivo de aumentar el potencial de transpiración del cultivo. A la vez que se realizaba el destallado, se eliminaban los frutos deformes para mejorar el aprovechamiento de los fotoasimilados producidos por la planta. Se procuró realizar esta operación antes de que los frutos alcanzaran el tamaño de una nuez. En la Fotografía 2.4 se puede observar el aspecto del cultivo en cada uno de los invernaderos al final del experimento.

2.1.5. Fertirrigación



Fotografía 2.5 Vista de la bandeja de riego a la demanda.

La composición de la solución nutritiva se fue variando a lo largo del ciclo con el fin de ajustarla a las absorciones del cultivo. En seis ocasiones durante el ciclo se realizaron análisis completos de las soluciones nutritivas tanto de aporte como de drenaje de cada invernadero para comprobar dicho ajuste. Asimismo, diariamente se midió la conductividad eléctrica (CE) y el pH tanto de la solución de aporte como de drenaje. Se procuró que la CE en el drenaje

se situara en torno a 3 dS m^{-1} , aunque en invierno se toleró una acumulación de hasta 4 dS m^{-1} , y que el pH estuviera en el rango 5-6,5.

Durante las primeras semanas de cultivo la programación del riego se realizó de forma horaria, ajustando diariamente la frecuencia de los riegos a las necesidades hídricas. Una vez que el sistema radicular alcanzó un buen desarrollo (unos dos meses después del trasplante), se activó la bandeja de demanda existente en cada invernadero con el fin de automatizar el inicio de los riegos (Fotografía 2.5).

2.1.6. Descripción y manejo de las instalaciones de climatización

Con el fin de optimizar las condiciones ambientales a las cuales estaba sometido el cultivo, cada invernadero se dotó de diversas instalaciones para el control activo del clima. Dichas instalaciones eran idénticas en ambos invernaderos y, junto con la ventilación natural, fueron gestionadas automáticamente por un controlador climático de acuerdo con unas consignas prefijadas.

2.1.6.1. Sistema de calefacción

Para hacer posible que la temperatura dentro de los invernaderos no bajase de la temperatura de consigna establecida en 18°C , se contó con un sistema de calefacción por agua caliente con tuberías de polietileno de alta densidad (Fotografía 2.6 y Fotografía 2.7).

En el periodo invernal, para contrarrestar el descenso térmico que tendía a producirse al recogerse la pantalla aluminizada interior de ahorro energético y mezclarse el volumen



Fotografía 2.6. Detalle de las tuberías de conducción del agua procedente de la caldera y de las de retorno a la misma.



Fotografía 2.7 Vista de la distribución de las tuberías de polietileno del sistema de calefacción en una línea de cultivo.



Fotografía 2.8 Vista de la sala de caldera.



Fotografía 2.9 Vista del tanque de almacenamiento del gas propano.

de aire comprendido entre ésta y la techumbre (de menor temperatura) con el que se encontraba en torno al cultivo, se aumentó la temperatura de consigna hasta los 20°C desde, aproximadamente, una hora antes de que comenzase a recogerse la pantalla interior.

La instalación común para los dos invernaderos era la sala de caldera (Fotografía 2.8) y la tubería metálica para la distribución y el retorno del agua caliente. El combustible utilizado fue gas propano licuado, el cual se almacenaba en el tanque mostrado en la Fotografía 2.9.

2.1.6.2. Pantalla de ahorro energético

En cada invernadero se dispuso una pantalla interior de ahorro de energía 100% aluminizada XLS A/A® (Fotografía 2.10). Esta pantalla, además de reducir el volumen de aire a mantener a la temperatura de consigna durante la noche, reducía las pérdidas de radiación de onda larga emitida por los cuerpos. La recogida/extensión de la pantalla interior



Fotografía 2.10 Vista de la pantalla interior de ahorro energético recogida .



Fotografía 2.11 Vista general de la pantalla interior de ahorro energético recogiéndose sobre el cultivo.

(Fotografía 2.11) era comandada por el controlador climático en función de la radiación exterior y la temperatura del aire. Así, la extensión se producía cuando la radiación exterior era inferior a 10 W m^{-2} y la temperatura del aire bajaba de 21°C . En cuanto a la recogida, ésta tenía lugar cuando la radiación exterior era superior a 10 W m^{-2} , aunque en invierno el horario de actuación de la pantalla se fijó de tal forma que dicha recogida se iniciara progresivamente media hora después de amanecer, con el fin de amortiguar la bajada de temperatura.

2.1.6.3. Pantalla de sombreo

En ambos invernaderos se instaló una pantalla exterior aluminizada para sombreo OLS 50 ABRI® (Fotografía 2.12). Esta pantalla era 50% aluminizada y se instaló sobre una estructura metálica sujeta a los canalones para la recogida del agua de lluvia de cada invernadero (Fotografía 2.13).

Su recogida y extensión respondía a consignas prefijadas de radiación, temperatura y déficit hídrico. La actuación de la pantalla se producía cuando la temperatura del aire del invernadero superaba los 31°C , estableciéndose una zona muerta de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Por déficit hídrico la pantalla empezaba a extenderse cuando este parámetro superaba 10 g m^{-3} ($\approx 1,7 \text{ kPa}$ de déficit de presión de vapor (DPV)) y terminaba al alcanzar 14 g m^{-3} ($\approx 2,3 \text{ kPa}$ de DPV). Finalmente, la actuación por radiación exterior varió entre invernaderos y en función de la etapa de desarrollo del cultivo y el estado de éste. Al inicio del cultivo la consigna de activación

se estableció en 400 y 500 W m^{-2} para el invernadero tipo venlo y el multitúnel respectivamente. Una vez enraizado suficientemente el cultivo, se desactivó la pantalla exterior



Fotografía 2.12 Vista de la pantalla de sombreo, desde el interior del invernadero, en proceso de extensión.



Fotografía 2.13 Vista de la estructura metálica de soporte de la pantalla de sombreo.

por radiación, volviéndose a activar en primavera en los periodos en los que se liaban los tallos sobre los hilos de rafia para evitar que el ápice de las plantas se marchitara como consecuencia del retorcimiento de los vasos xilemáticos. En esta fase se estableció una extensión gradual a partir de 700 y 800 W m⁻² en el invernadero tipo venlo y en el multitúnel respectivamente. La plena extensión de la pantalla se estableció en 1300 y 1400 W m⁻² respectivamente.

2.1.6.4. Sistema de nebulización

Para aumentar el contenido de humedad del aire y evitar situaciones de estrés hídrico en el cultivo, se dispuso de un sistema de nebulización de alta presión (fogsystem), aunque sólo estuvo operativo durante un cierto periodo en primavera, debido a la existencia de



Fotografía 2.14 Vista del cabezal del sistema de nebulización usado durante el experimento.



Fotografía 2.15 Detalle de dos boquillas del sistema de nebulización en funcionamiento.

problemas técnicos al inicio del ciclo de cultivo y a la toxicidad inducida en las plantas por los depósitos de sodio al final del mismo. Este sistema disponía de un cabezal (Fotografía 2.14) donde se encontraba el equipo de filtrado, el equipo de tratamiento del agua por descalcificación, el equipo de bombeo y las válvulas motorizadas para la apertura y cierre de los sectores. El cabezal era común para los dos invernaderos, por lo que ambos no podían funcionar simultáneamente. La instalación se completó con 3 tuberías de acero inoxidable por invernadero dispuestas en dirección este-oeste y separadas 8 m entre sí, que portaban 2 boquillas nebulizadoras (una orientada al norte y otra al sur) cada 2 metros (en cada pasillo) (Fotografía 2.15).

El funcionamiento del sistema de nebulización fue automático y tuvo lugar cuando el déficit hídrico superaba 9 g m⁻³ (\approx 1,5 kPa de DPV). Cada activación se restringía a un periodo comprendido entre 7 y 10 segundos,

con el fin de evitar en la medida de lo posible que las plantas situadas bajo los emisores llegaran a mojarse y el cloruro sódico añadido al agua en el proceso de descalcificación provocara toxicidad en las hojas.

2.1.6.5. Sistema de enriquecimiento carbónico

En cada invernadero se dispuso de un sistema de enriquecimiento del aire en anhídrido carbónico a través de tuberías microperforadas. Se colocó una tubería por cada línea doble de cultivo (Fotografía 2.16). Se empleó CO_2 puro, el cual se almacenaba licuado en un tanque de alta presión (Fotografía 2.17), a cuya salida se disponía un reductor de presión y un intercambiador de calor para el proceso de gasificación (Fotografía 2.18). El transporte del gas hasta los invernaderos se realizó mediante sendas tuberías de polietileno enterradas.



Fotografía 2.16 Detalle de la tubería de suministro de CO_2 en el interior del invernadero.



Fotografía 2.17 Vista del tanque donde se almacenaba el CO_2 licuado y del intercambiador de calor.



Fotografía 2.18 Detalle del intercambiador de calor empleado en el proceso de gasificación.

El aporte era activado en función del grado de apertura de las ventanas, la velocidad del viento y la radiación exterior. Así, se procuró mantener en el invernadero al menos la concentración de CO_2 del aire exterior (350 ppm). Esta concentración mínima se incrementó

hasta en 500 ppm (850 ppm) al alcanzarse una radiación exterior de 400 W m^{-2} y se redujo en la misma cantidad a partir de una apertura de ventanas del 15%. Asimismo, se estableció una reducción de 100 ppm al alcanzarse una velocidad de viento de 12 m s^{-1} .

2.2. DETERMINACIONES

2.2.1. Clima

Para la determinación de los parámetros climáticos se emplearon distintos sensores. En cada invernadero se instaló:

-Un psicrómetro ventilado (Fotografía 2.19) provisto de dos sondas pt-100 (mod. 1.1130, Thies Clima, Alemania) para medir la temperatura de bulbo seco y húmedo del aire. Ambos parámetros fueron medidos cada 5 segundos, almacenándose el dato medio cada 5 minutos. El psicrómetro se localizó en el centro del invernadero y se fue variando verticalmente en altura conforme crecía el cultivo, de forma que siempre se dispuso junto al extremo apical de la planta. El DPV del aire se calculó a partir de las temperaturas seca y húmeda disponibles cada 5 minutos.



Fotografía 2.19 Vista exterior y detalle del interior del psicrómetro ventilado usado durante el experimento.

- Un filtro de aspiración (Fotografía 2.20) que tomaba muestras de aire del invernadero para conducirlos a través de un microtubo hasta un analizador de CO_2 (modelo APBA-250E, HORIBA, Alemania), el cual llevaba a cabo las medidas de concentración de este gas. La localización y movilidad del filtro fue idéntica a la del psicrómetro ventilado.

Para caracterizar las condiciones climáticas en el exterior se utilizaron los datos de una estación meteorológica instalada en las proximidades de los invernaderos. Esta estación meteorológica disponía de un psicrómetro ventilado, similar a los dispuestos en el interior



Fotografía 2.20 Detalle del filtro de aspiración.



Fotografía 2.21 Vista del sensor lineal de radiación PAR.

de los invernaderos, para la medida de las temperaturas seca y húmeda del aire, un anemómetro y una veleta para la medida de la velocidad y la dirección del viento respectivamente, un piranómetro para medir la radiación solar y un sensor de detección de lluvia.

La radiación incidente sobre el cultivo en cada invernadero se estimó a partir de las medidas de radiación exterior, para lo cual se determinó la transmisividad del material de cubierta a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en días despejados, con una frecuencia quincenal. Para ello se empleó un sensor lineal de 1 m de longitud (LI-191SA, Licor Inc., Lincoln, Nebraska, EE.UU.) (Fotografía 2.21). Las medidas de transmisividad se realizaron en la zona central de un pasillo seleccionado al comienzo del experimento en cada nave, el cual permaneció invariable a lo largo del mismo. Para esta determinación se tomaron 8 puntos, distantes 1 m entre sí, y en cada punto se realizaron 2 medidas.

2.2.2. Producción de fruto

Los frutos se recolectaron semanalmente a partir de los 98 DDT, una vez habían alcanzado el color rojo, a excepción de la recolección final, en la que se cogieron todos los frutos que quedaban en la planta. La producción se controló sobre un total de 4 repeticiones de 16 plantas cada una. La producción correspondiente a cada repetición y cosecha se clasificó atendiendo a las normas de calidad para pimientos dulces (Reglamento UE 1455/1999, modificado por el Reglamento UE 2706/2000). Se determinó tanto el peso fresco como el número de frutos correspondiente.

2.2.3. Consumo de inputs

2.2.3.1. Consumo de agua

2.2.3.1.1. Absorción de agua por el cultivo

La absorción de agua por el cultivo se determinó diariamente para cada tratamiento a partir del aporte registrado por dos goteros de control y del volumen de lixiviado obtenido en cada una de las 3 bandejas de drenaje instaladas por invernadero, lo que permitió establecer un balance entre aporte y drenaje. Por tanto, se dispuso de 3 repeticiones por cada tratamiento.

2.2.3.1.2. Consumo de agua por el sistema de nebulización

El consumo de agua por el sistema de nebulización se determinó mediante la lectura diaria de un contador volumétrico situado a la entrada de dicho sistema. Además, se dispuso de un contador de tiempo de actuación para cada sector, cuya lectura se tomó diariamente, de forma que el consumo correspondiente a cada invernadero se calculó como la parte proporcional del consumo global del sistema en relación al tiempo de actuación.

2.2.3.2. Consumo de fertilizantes

Se controló el aporte de fertilizantes a cada nave necesario para la elaboración de sus respectivas soluciones madre, así como las cantidades tiradas de los mismos cuando fue preciso llevar a cabo un cambio rápido de abonado. De este modo fue posible establecer un balance y calcular las cantidades de fertilizantes gastadas en cada tratamiento.

2.2.3.3. Consumo de anhídrido carbónico

Diariamente se tomó lectura de un contador de tiempo de activación para cada tratamiento. Dado que el caudal de CO_2 inyectado por el sistema era conocido, fue posible calcular la cantidad de gas aportado a cada sector.

2.2.3.4. Consumo de combustible

El consumo de gas propano en cada tratamiento se determinó a partir de la lectura diaria de un contador energético situado en cada invernadero (Fotografía 2.22). Este contador realizaba un balance de energía entre la entrada y la salida de la tubería de calefacción en el invernadero a partir de los caudales y las temperaturas de ida y retorno. A partir del consumo energético se calculó el gasto de propano dividiendo por el poder calorífico de este combustible ($11450 \text{ kcal kg}^{-1}$).



Fotografía 2.22 Detalle del contador energético de calefacción.



Fotografía 2.23 Detalle del contador eléctrico general.

2.2.3.5. Consumo eléctrico

El consumo eléctrico general de cada invernadero se determinó mediante la lectura diaria de sendos contadores eléctricos (Fotografía 2.23) situados en el cuadro eléctrico de entrada. Además, había un contador que registraba el consumo eléctrico general del sistema de nebulización y, para calcular el consumo correspondiente a cada invernadero, se hizo uso del tiempo de actuación del sistema en cada uno de ellos, de forma similar a como se calculó el consumo de agua de dicho sistema. El consumo de energía eléctrica por la bomba de riego se estimó a partir de la potencia de la misma y del tiempo de activación en cada sector.

2.2.4. Estudio económico

Para cada tratamiento se determinó el umbral de rentabilidad del sistema de cultivo como el precio medio mínimo necesario para cubrir costes, incluyendo la amortización de la estructura y de los equipos instalados, la mano de obra necesaria y otros gastos de cultivo.

2.2.5. Análisis estadístico

Los datos de producción de fruto se sometieron al análisis de la varianza (Test ANOVA) para determinar la posible existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los dos tratamientos estudiados. Para ello se utilizó el programa estadístico Statgraphics Plus 4.1. (Manugistics Inc., EE.UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CLIMA

3.1.1. Temperatura del aire

En el Cuadro 3.1 se reflejan los valores medios de la temperatura del aire registrada durante el experimento en cada uno de los invernaderos, así como en el exterior. Las temperaturas medias fueron superiores en el invernadero tipo venlo, aunque en ningún caso superaron en más de 1°C las registradas en el invernadero multitúnel.

Cuadro 3.1 Valor medio durante el ciclo de cultivo de la temperatura (°C) media diaria, diurna y nocturna y de la temperatura máxima y mínima diaria de cada invernadero y del exterior.

Temperatura	EXTERIOR	MULTITÚNEL	VENLO
Media diaria	15,8	20,5	21,0
Media diurna	17,9	22,6	23,5
Media nocturna	13,7	18,4	18,6
Máxima diaria	20,7	26,6	27,6
Mínima diaria	11,6	16,5	17,0

La Figura 3.1 muestra la evolución de la temperatura máxima diaria. Las diferencias térmicas entre invernaderos se produjeron básicamente al inicio del experimento, durante los meses de septiembre y octubre, cuando el cultivo estaba aún poco desarrollado y ejercía un escaso efecto modulador sobre el clima. La mayor tasa de ventilación del invernadero multitúnel, como consecuencia de su mayor superficie de ventanas, junto con su menor transmisividad a la radiación (Figura 3.5), propiciaron que se alcanzase en él una temperatura notablemente menor durante esta fase. A partir de los 60 DDT aproximadamente estas diferencias se anularon, coincidiendo con un índice de área foliar alcanzado por el cultivo en torno a 1,4 m² m⁻².

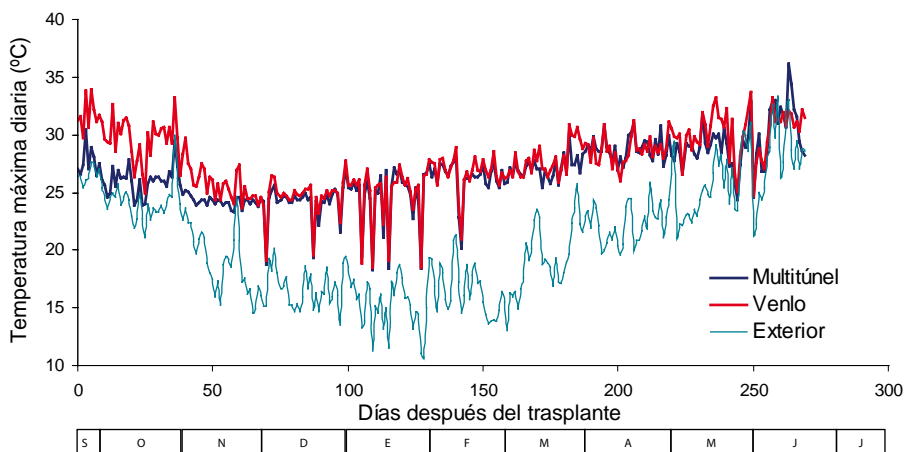


Figura 3.1 Evolución de la temperatura máxima diaria del aire del invernadero y del exterior.

3.1.2. Déficit de presión de vapor (DPV)

En el Cuadro 3.2 se presentan los valores medios de DPV del aire registrados durante el ensayo en cada uno de los invernaderos, así como en el exterior. Dichos valores fueron muy similares tanto en los invernaderos como en el exterior, aunque en general fueron algo más elevados en el invernadero tipo venlo que en el multitúnel.

Cuadro 3.2 Valor medio durante el ciclo de cultivo del déficit de presión de vapor (DPV, kPa) medio diario, diurno y nocturno y del DPV máximo y mínimo diario de cada invernadero y del exterior.

DPV	EXTERIOR	MULTITÚNEL	VENLO
Medio diario	0,6	0,6	0,7
Medio diurno	0,9	0,8	0,9
Medio nocturno	0,4	0,4	0,5
Máximo diario	1,3	1,4	1,4
Mínimo diario	0,1	0,3	0,3

El DPV medio diurno (Figura 3.2) siguió una tendencia similar en ambos invernaderos, sin que apenas se apreciaran diferencias entre ambos durante todo el ciclo de cultivo, salvo al inicio del mismo, cuando el cultivo mostraba aún un escaso porte y ejercía poca influencia sobre el clima, de forma que el DPV fue considerablemente mayor en el invernadero tipo venlo como consecuencia de su mayor temperatura en dicha fase (Figura 3.1). A partir de los 35 DDT, el DPV medio registrado sólo fue ligeramente superior en dicho

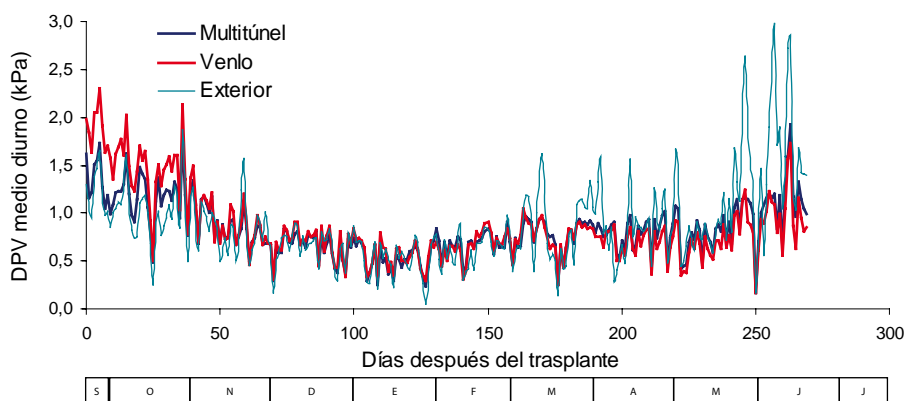


Figura 3.2 Evolución del déficit de presión de vapor (DPV) medio diario del aire del invernadero y del exterior.

invernadero. Sin embargo, a partir de los 185 DDT el DPV medio diario comenzó a ser ligeramente mayor en el invernadero multitúnel, posiblemente como consecuencia del menor desarrollo foliar del cultivo.

3.1.3. Concentración de CO₂

En el Cuadro 3.3 se muestran los valores medios de la concentración de CO₂ del aire registrada durante el experimento en cada uno de los invernaderos, así como en el exterior. Se observa que, por término medio, dicha concentración fue mayor en el invernadero multitúnel que en el venlo, debido fundamentalmente a que el sistema de enriquecimiento carbónico pudo activarse durante más tiempo en dicho invernadero, al registrarse temperaturas menos elevadas y ser necesaria una menor apertura de las ventanas (Figura 3.3). Por esta misma causa, la concentración de CO₂ fue superior durante los meses invernales que en otoño y primavera.

Cuadro 3.3 Valor medio durante el ciclo de cultivo de la concentración de anhídrido carbónico (CO₂, ppm) media diaria, diaria y nocturna y de la concentración máxima y mínima diaria de cada invernadero y del exterior.

CO ₂	EXTERIOR	MULTITÚNEL	VENLO
Media diaria	352	481	457
Media diaria	348	465	437
Media nocturna	355	503	482
Máxima diaria	388	778	731
Mínima diaria	323	370	358

La Figura 3.3 muestra la evolución media horaria de la concentración de CO_2 a lo largo del día durante tres meses diferentes del ciclo de cultivo. Asimismo, teniendo en cuenta que el aporte de CO_2 era influenciado por el grado de apertura de las ventanas, también se representa el porcentaje de apertura de las mismas. Se observa que las mayores diferencias entre invernaderos se produjeron en el periodo invernal ya que fue cuando hubo menores necesidades de ventilación y mayor activación del sistema de enriquecimiento carbónico. Al inicio del cultivo y en primavera, las menores concentraciones se registraron en torno al mediodía solar (Figura 3.3a y c), cuando se hacía más necesaria la ventilación de los invernaderos, lo que implicaba un mayor grado de apertura de las ventanas y, en función de éste, un valor más restrictivo de consigna para el funcionamiento del sistema de enriquecimiento carbónico. Además, al mediodía existe un mayor régimen radiativo, lo que a su vez implica una mayor tasa fotosintética y, por tanto, un mayor consumo de CO_2 .

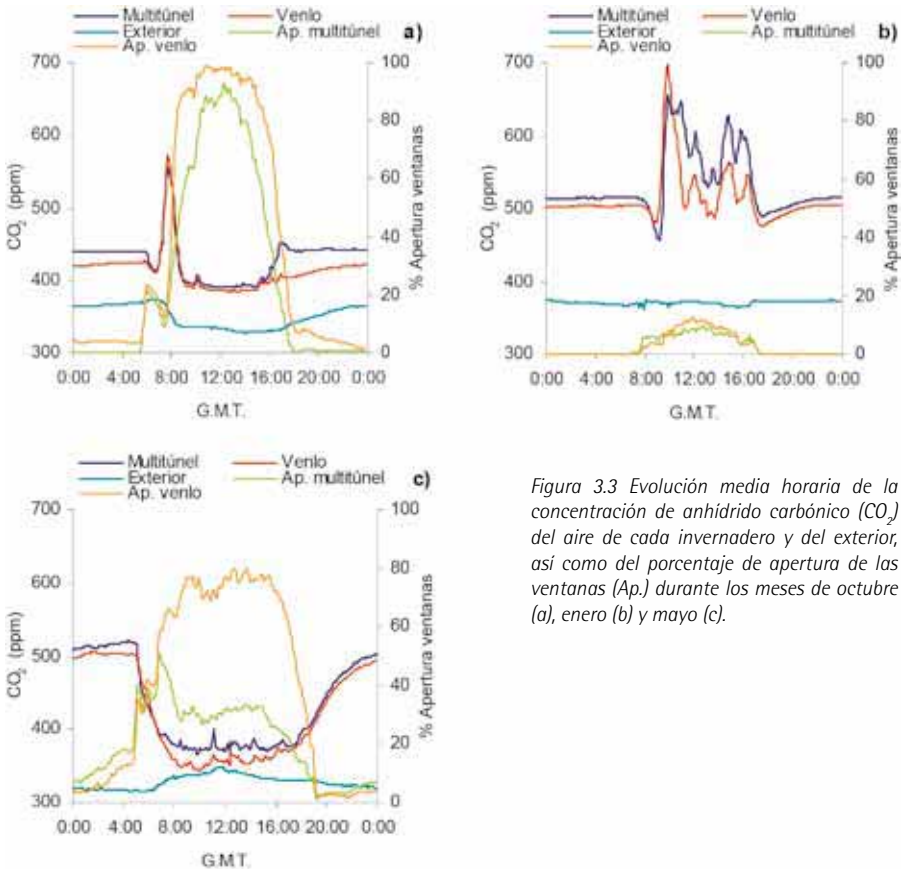


Figura 3.3 Evolución media horaria de la concentración de anhídrido carbónico (CO_2) del aire de cada invernadero y del exterior, así como del porcentaje de apertura de las ventanas (Ap.) durante los meses de octubre (a), enero (b) y mayo (c).

3.1.4. Radiación

La integral de radiación acumulada en cada uno de los invernaderos al final del experimento ascendió a 1576 y 1962 MJ m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, por lo que la integral correspondiente al venlo fue un 24,5% superior a la del multitúnel. Esta diferencia tuvo lugar a pesar de extenderse un poco más la pantalla exterior de sombreo en el primero (Figura 3.4) y se debió a su mayor transmisividad (Figura 3.5). Con respecto al exterior, la integral global de radiación durante el experimento fue de 4141 MJ m⁻², siendo la de los invernaderos el 38,1 y 47,4% de la exterior.

La Figura 3.4 muestra la evolución de la radiación media horaria a lo largo del día en el interior de los invernaderos y el exterior durante tres meses representativos del ciclo de

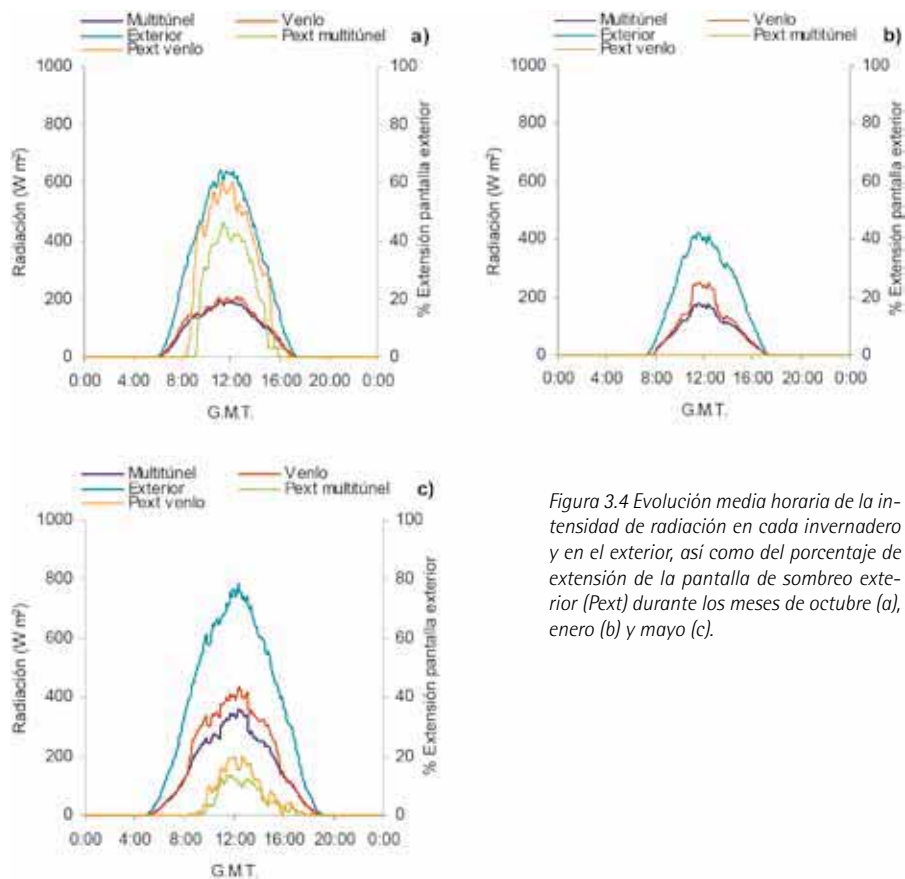


Figura 3.4 Evolución media horaria de la intensidad de radiación en cada invernadero y en el exterior, así como del porcentaje de extensión de la pantalla de sombreo exterior (Pext) durante los meses de octubre (a), enero (b) y mayo (c).

cultivo, así como de la posición de la pantalla exterior de sombreo. En el mes de octubre la radiación en el interior de los invernaderos fue muy similar, resultando sólo ligeramente superior en el venlo. Esto se debió a que la pantalla exterior llegó a extenderse en torno a un 15% más en dicho invernadero en el periodo de mayor intensidad luminosa con respecto al multitúnel, con el fin de evitar que el cultivo se viese afectado negativamente por las altas temperaturas registradas en ese periodo (Figura 3.1), teniendo en cuenta el pequeño estado de desarrollo que aún presentaba. Además, durante dicho mes la pantalla de sombreo en el venlo se extendió durante más tiempo a lo largo del día. En el mes de enero, las diferencias entre invernaderos se acentuaron notablemente en torno al mediodía solar, como consecuencia de la transmisividad a la radiación notablemente mayor registrada en el venlo en ese momento (Figura 3.5) y a que en este mes no fue necesaria la extensión de la pantalla de sombreo, la cual habría amortiguado las diferencias entre invernaderos. Por último, en el mes de mayo, las diferencias entre invernaderos se incrementaron debido a la mayor duración del periodo diurno y la mayor altura solar.

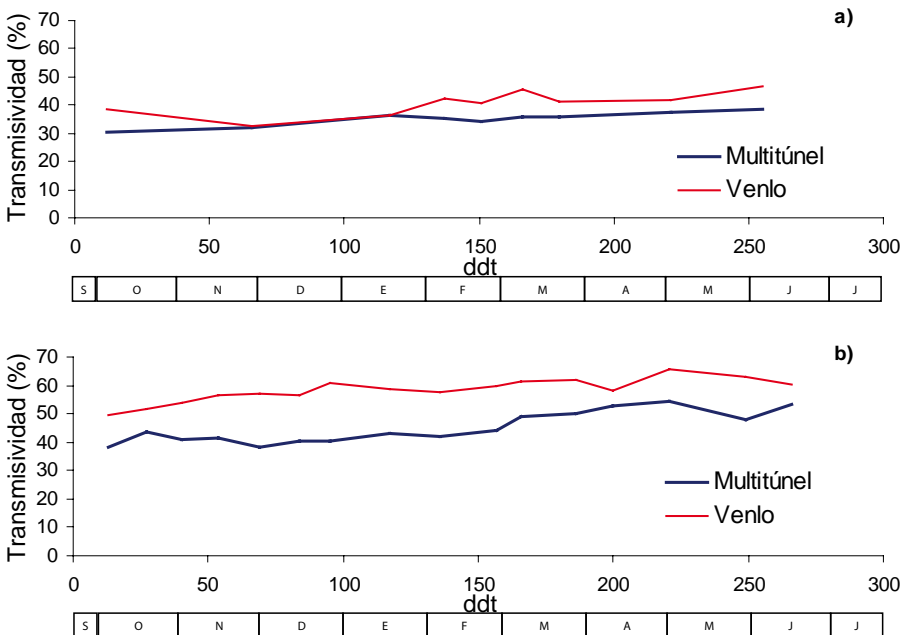


Figura 3.5 Evolución de la transmisividad de la cubierta de cada invernadero a la radiación PAR a distintas horas del día: 8 GMT (a) y 12 GMT (b).

La Figura 3.5 muestra la evolución de la transmisividad de la cubierta de los invernaderos a la radiación PAR a dos horas distintas del día a lo largo del ciclo de cultivo. La transmisividad media de la cubierta a las 8 GMT (Figura 3.5a) fue del 35,1 y el 40,7% en los

invernaderos multitúnel y venlo, respectivamente. La diferencia relativamente pequeña obtenida a primera hora del día se debe a que, en condiciones de escasa elevación solar, buena parte de la radiación es difusa y las transmisividades a dicha radiación del plástico y el cristal resultan similares (Papadakis y col., 2000). Al avanzar el día, aumentó el régimen radiativo hasta el mediodía solar y con ello la transmisividad, de forma que a las 12 GMT (Figura 3.5b) se alcanzó una transmisividad media del 45,0 y el 58,3% en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente. El aumento de las diferencias de transmisividad entre invernaderos hacia el mediodía es consecuencia del aumento de la proporción de radiación directa. El valor medio de transmisividad registrado en torno al mediodía solar cuando la pantalla de sombreo estaba totalmente extendida fue del 17,4 y el 20,9% en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente.

3.2. PRODUCCIÓN DE FRUTO

3.2.1. Producción estacional

La Figura 3.6 muestra la evolución de la producción comercial acumulada en los dos invernaderos a lo largo del ciclo de cultivo. La productividad final del cultivo fue similar en ambos invernaderos ya que, aunque el venlo presentó una producción total y comercial ($17,6 \text{ kg m}^{-2}$ y $15,9 \text{ kg m}^{-2}$ respectivamente) ligeramente mayor que el multitúnel ($17,6 \text{ kg m}^{-2}$ y $15,8 \text{ kg m}^{-2}$), las diferencias obtenidas no resultaron en ningún caso significativas, de forma análoga a lo sucedido con la producción no comercial, la cual fue ligeramente superior en el invernadero multitúnel (Cuadro 3.4).

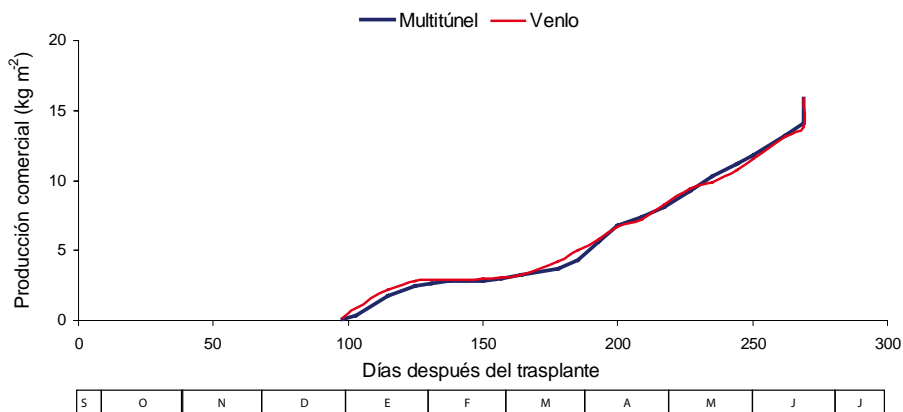


Figura 3.6 Evolución de la producción fresca de fruto comercial acumulada a lo largo del experimento para cada tratamiento.

En cuanto a la distribución de la producción comercial por categorías, ésta fue similar en ambos tratamientos, presentando una producción de primera categoría ligeramente mayor el invernadero tipo venlo (14,2 kg m⁻²) que el multitúnel (14,1 kg m⁻²), aunque la producción de segunda categoría fue ligeramente mayor en el multitúnel. En ningún caso se produjeron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

El invernadero multitúnel presentó un número de frutos por unidad de superficie ligeramente mayor (89,0 frutos m⁻²) que el tipo venlo (85,6 frutos m⁻²), pese a que el número de frutos comerciales fue similar en ambos tratamientos, hallándose las diferencias, por tanto, en el número de frutos no comerciales. No obstante, en ningún caso hubo diferencias estadísticamente significativas.

Cuadro 3.4 Producción fresca de fruto (kg m⁻²) y número de frutos (Ud m⁻²) acumulados para cada tratamiento. Para cada parámetro, valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna denotan que no existen diferencias significativas entre tratamientos según el análisis de la varianza (P<0,05). Cada valor es media de 4 repeticiones.

PRODUCCIÓN					
TRATAMIENTOS	TOTAL	COMERCIAL			NO COMERCIAL
		COMERCIAL	CAT . I	CAT . II	
MULTITÚNEL	17,6 a	15,8 a	14,1 a	1,7 a	1,8 a
VENLO	17,6 a	15,9 a	14,2 a	1,7 a	1,7 a

NÚMERO DE FRUTOS					
TRATAMIENTOS	TOTALES	COMERCIALES			NO COMERCIALES
		COMERCIALES	CAT . I	CAT . II	
MULTITÚNEL	89,0 a	69,7 a	60,7 a	9,0 a	19,3 a
VENLO	85,6 a	69,4 a	60,9 a	8,5 a	16,2 a

Los resultados correspondientes a la producción fresca de frutos coinciden con los de la producción total de materia seca (datos no mostrados), parámetro para el que tampoco se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, a pesar de la mayor radiación incidente sobre el cultivo en el invernadero venlo. La mayor eficiencia fotosintética obtenida en el invernadero multitúnel podría ser consecuencia del diferente tipo de radiación existente en uno y otro invernadero ya que, mientras el plástico de cubierta utilizado en el ensayo presentaba una considerable capacidad difusora, el cristal tenía una elevada transmisividad a la radiación directa, y se produce mayor respuesta fotosintética a la luz difusa debido al mayor poder de penetración y a la distribución más uniforme de ésta dentro del dosel vegetal (Lorenzo, 1996), lo cual posibilita la disminución de los efectos de saturación en las partes altas del cultivo y permite aumentar la fotosíntesis en las partes más bajas (Jongschaap y col., 2006). A esto habría que unir el hecho de que la mayor temperatura media registrada en el venlo debió determinar mayores pérdidas por respiración que en el multitúnel, teniendo en cuenta que la tasa de respiración aumenta con la temperatura (Giménez, 1992). Del mismo modo, la concentración media de CO₂ ligeramente mayor registrada en el multitúnel durante el día debió

favorecer la actividad fotosintética del cultivo en este invernadero. Por tanto, la suma de estos efectos podría haber contrarrestado la mayor radiación incidente sobre el cultivo en el invernadero venlo.

3.2.2. Producción no comercial

La Figura 3.7 muestra la evolución de la producción no comercial a lo largo del ciclo de cultivo. Las diferencias entre invernaderos fueron muy tenues durante todo el ciclo y, pese a que la producción de destrío fue pequeña, la mayor parte se obtuvo al final del cultivo. El invernadero multitúnel fue el que presentó una producción no comercial acumulada ligeramente mayor durante casi todo el ciclo de cultivo, lo que también sucedió al final del mismo (1,8 frente a 1,7 kg m⁻²), no obteniéndose diferencias significativas a un nivel de confianza del 95% entre invernaderos.

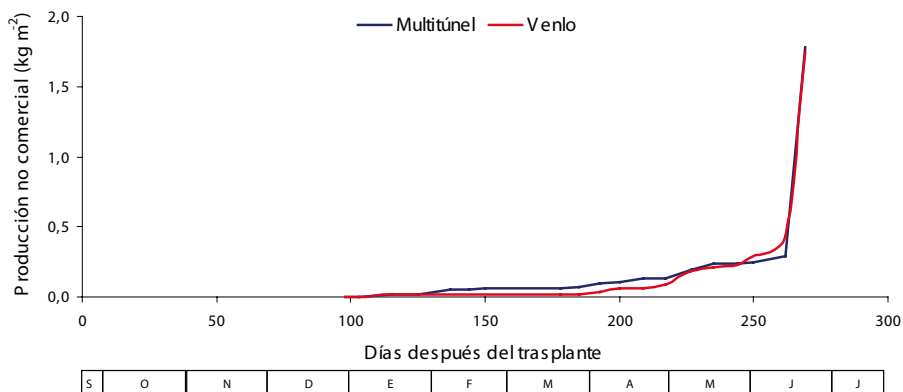


Figura 3.7 Evolución de la producción fresca de fruto no comercial acumulada a lo largo del experimento para cada tratamiento.

La Figura 3.8 refleja la distribución porcentual de la producción no comercial obtenida durante todo el ciclo de cultivo en los dos invernaderos. Esta producción supuso el 10,1 y el 9,9% de la producción total de los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente. En ambos, la mayor producción no comercial se obtuvo en la última recolección, a la que corresponden los frutos inmaduros, los cuales no habían alcanzado aún la madurez en el momento de concluir el experimento, lo que impidió su comercialización al final del ciclo de cultivo. Este tipo de frutos supuso más de la mitad de la producción de destrío. En cuanto a los demás tipos de frutos no comerciales, existió heterogeneidad entre invernaderos y puede decirse que no hubo ningún grupo mayoritario, aunque en el invernadero tipo venlo (Figura 3.8b) los frutos deformes y con virosis alcanzaron un alto porcentaje (16 y 11% respectivamente), lo que también sucedió en el invernadero multitúnel (Figura 3.8a) con los frutos deformes y rajados (11% en ambos casos).

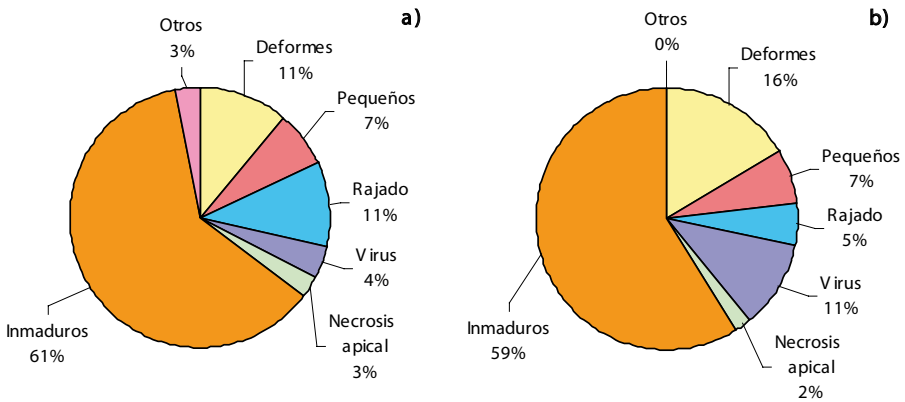


Figura 3.8 Distribución porcentual de la producción estacional de destribo obtenida en el invernadero multitúnel (a) y en el venlo (b).

3.3. CONSUMO DE INSUMOS

3.3.1. Consumo de agua

3.3.1.1. Agua aportada en el riego

El aporte acumulado siguió una tendencia similar en ambos tratamientos, aunque el invernadero tipo venlo empezó a distinguirse sobre el multitúnel a partir de los 115 ddt (Figura 3.9). Las diferencias se acentuaron al final del ciclo de cultivo, pero sin llegar a ser estadísticamente significativas. Los aportes globales de agua de riego fueron de 747 L m⁻² en el invernadero tipo venlo y de 681 L m⁻² en el multitúnel.

En lo que se refiere al volumen de agua recogido en los drenajes, éste fue muy similar en ambos invernaderos, situándose al final del experimento en 212 L m⁻² en el invernadero multitúnel y en 224 L m⁻² en el tipo venlo, los cuales constituyeron el 31,1 y el 30,0% del agua aportada en el riego respectivamente.

El volumen de agua absorbida por el cultivo fue ligeramente superior desde el inicio del ciclo de cultivo en el invernadero tipo venlo, aunque al final del mismo no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas. El volumen acumulado final fue de 469 y 522 L m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente. La mayor absorción de agua registrada en el invernadero venlo respecto al multitúnel, debió ser consecuencia del mayor área foliar y la mayor radiación incidente sobre el cultivo en el primero.

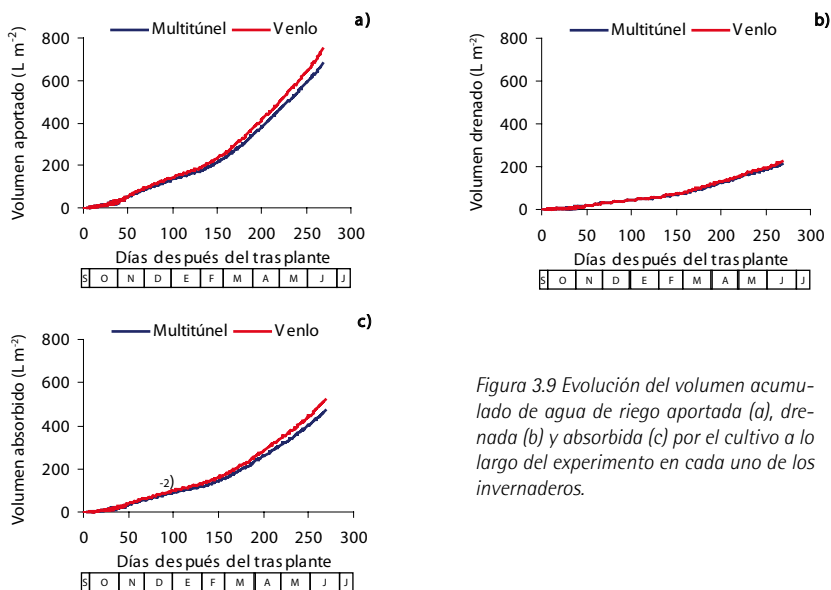


Figura 3.9 Evolución del volumen acumulado de agua de riego aportada (a), drenada (b) y absorbida (c) por el cultivo a lo largo del experimento en cada uno de los invernaderos.

3.3.1.2. Agua aportada a través del sistema de nebulización

El gasto total de agua durante el experimento fue de 703 y 758 L m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, de los cuales tan sólo 21,5 y 11,2 L m⁻² fueron aportados a través del sistema de nebulización, lo que supuso el 3,1 y el 1,5% del gasto total.

El aporte de agua de nebulización en el invernadero multitúnel casi duplicó al del venlo (Figura 3.10), debido a que la actuación de este sistema no fue posible al inicio del ciclo de cultivo por problemas técnicos y, cuando comenzó su actuación en primavera, existía un mayor área foliar en el venlo, lo que determinó un mayor potencial de transpiración del cultivo y un mayor nivel de humedad del aire del invernadero.

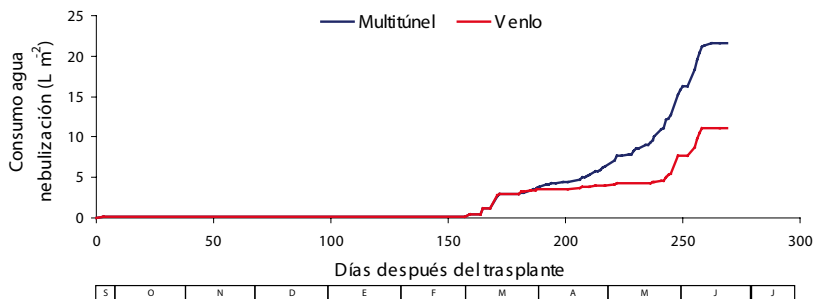


Figura 3.10 Evolución del volumen acumulado de agua aportada a través del sistema de nebulización durante el experimento en cada uno de los invernaderos.

3.3.2. Consumo eléctrico

La Figura 3.11 muestra la evolución del consumo eléctrico acumulado en los dos invernaderos durante el experimento. En ella se puede apreciar como el consumo del invernadero multitúnel fue ligeramente mayor que el del venlo desde el inicio del ciclo de cultivo, lo cual resulta lógico teniendo en cuenta el mayor número de motores existentes en el primero para la apertura y cierre de las ventanas.

El consumo eléctrico total en los invernaderos multitúnel y venlo fue de 350 y 326 Wh m⁻² respectivamente, de los cuales 205 y 177 Wh m⁻² correspondieron al invernadero propiamente dicho, que a su vez engloba la bomba de impulsión del agua de

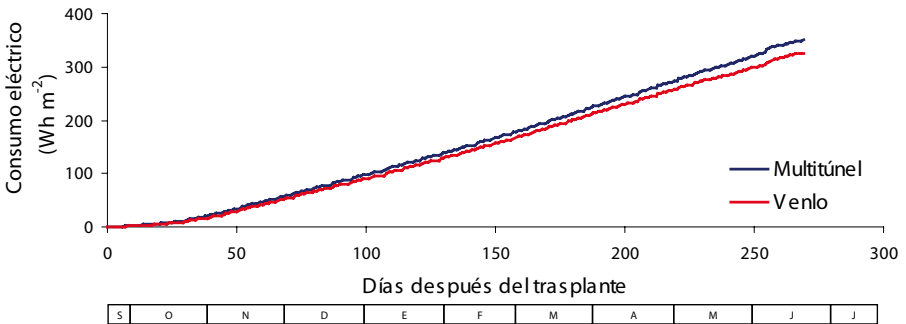


Figura 3.11 Evolución del consumo eléctrico general acumulado durante el experimento en cada uno de los invernaderos.

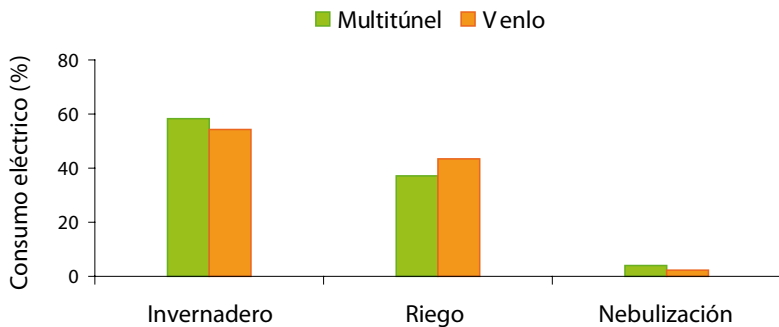


Figura 3.12 Distribución porcentual del consumo eléctrico entre el gasto correspondiente al invernadero (sistema de calefacción, pantallas y ventanas), el sistema de riego y el sistema de nebulización en cada invernadero.

calefacción, la extensión/recogida de las pantallas y la automatización de las ventanas. Esta partida se erigió como la principal ya que constituyó el 58,5 y 54,2% del consumo eléctrico total de los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, y fue seguida por el gasto correspondiente a la bomba de riego, cuyo funcionamiento supuso un consumo de 130 y 143 Wh m⁻², lo que constituyó el 37,3 y el 43,7% del consumo eléctrico total. En cuanto al consumo eléctrico debido al sistema de nebulización, éste fue minoritario y se cuantificó en 15 y 7 Wh m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, lo que supuso tan sólo el 4,2 y el 2,1% del consumo eléctrico total (Figura 3.12).

3.3.3. Consumo de propano

La Figura 3.13 muestra la evolución del consumo acumulado de propano durante el experimento. Al final del mismo dicho consumo fue de 10,7 y 9,9 kg m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente.

La entrada en funcionamiento del sistema de calefacción se produjo a los 12 y 18 ddt en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, para cesar a los 259 ddt en ambos. El consumo de propano fue ligeramente superior desde el inicio en el invernadero multitúnel, pero estas diferencias se hicieron más acusadas a partir del mes de marzo, coincidiendo con una atenuación del consumo. Dichas diferencias no parecen ser debidas a que las pérdidas de energía a través de la cubierta sean mayores con plástico que con cristal (Magán y col., 2005), sino más bien a que el invernadero venlo se calienta más rápidamente que el multitúnel por la mañana debido a su mayor transmisividad a la radiación y a que tarda más en enfriarse por la tarde tras haber alcanzado una mayor temperatura durante el día. De hecho en invierno, cuando la temperatura fue muy similar en ambos invernaderos, el consumo de combustible fue parecido.

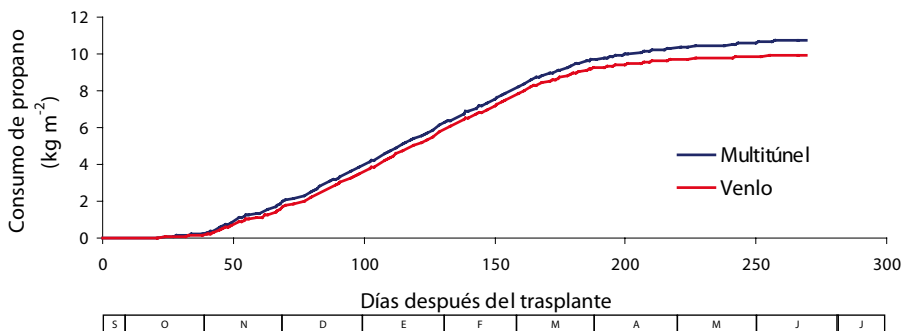


Figura 3.13 Evolución del consumo acumulado de propano (kg m⁻²) durante el experimento en cada uno de los invernaderos.

3.3.4. Consumo de anhídrido carbónico

La Figura 3.14 muestra la evolución del consumo acumulado de anhídrido carbónico durante el experimento en los dos invernaderos. El aporte total fue de 4,9 y 3,5 kg m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, siendo la diferencia entre ambos próxima al 30%. Dichas diferencias comenzaron a apreciarse en noviembre y aumentaron de forma considerable durante la primavera. Esto fue consecuencia de las mayores necesidades de ventilación en el invernadero venlo, teniendo en cuenta que el aumento de la concentración de CO₂ por encima de la exterior se restringía a los periodos en los que las ventanas presentaban pequeñas aperturas para evitar pérdidas excesivas de gas.

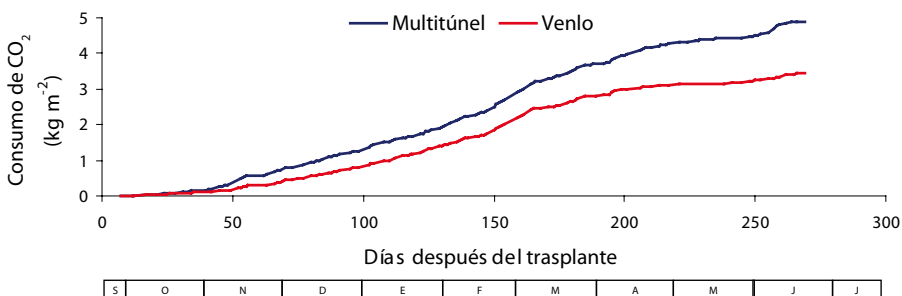


Figura 3.14 Evolución del consumo acumulado de anhídrido carbónico durante el experimento en cada uno de los invernaderos.

3.4. ESTUDIO ECONÓMICO

En este estudio se pretende realizar un análisis de los costes que supone cultivar pimiento tipo California en dos tipos distintos de invernaderos industriales (multitúnel y venlo) provistos de diversos sistemas de control climático en las condiciones del sureste español, tales como los que han sido objeto del presente experimento. El objetivo será determinar el precio al que habría que vender el kg de pimiento que permitiese sufragar la inversión de las instalaciones y los costes de producción, y de esta forma definir el umbral a partir del cual se obtendrían beneficios. La única diferencia entre los dos casos estudiados será el tipo de invernadero y las variaciones en el consumo de inputs.

En la realización de este estudio se ha supuesto para cada caso una superficie invernada de 10 ha, superficie que resulta razonable para una explotación altamente tecnificada como la que se considera con el fin de reducir la repercusión de las inversiones por unidad de superficie. De este modo, los sistemas de uso compartido para los distintos módulos (cabezal de riego, gasificadora, caldera y depósito de CO₂), así como las instalaciones anexas necesarias para el funcionamiento adecuado de la explotación (balsa de riego y

nave) y la maquinaria se han dimensionado en función de dicha superficie. Asimismo se ha considerado el uso de gas natural licuado en lugar de propano (que fue el combustible realmente utilizado durante el experimento) debido al menor precio del primero.

En el Cuadro 3.5 se muestra el coste de cada una de las partidas correspondientes a la inversión. El montante de la inversión total alcanza los 59,80 y 85,40 € m⁻² para los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, de los cuales la estructura constituye el 30,1 y el 52,7%. El resto de partidas destacadas se corresponden con el sistema de calefacción (16,7 y 11,7% para los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente) y la pantalla de sombreado exterior (20,1 y 14,1%).

Las amortizaciones se han calculado bajo el criterio de amortización técnica y por anualidades constantes (Caballero y col., 2004). Los costes fijos anuales así obtenidos quedan reflejados en el Cuadro 3.5 y ascienden en total a 5,60 y 5,73 € m⁻² año⁻¹ para los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente.

En lo que se refiere a los costes variables, éstos quedan detallados en el Cuadro 3.6 y alcanzan en total 12,89 y 12,87 € m⁻² año⁻¹ para los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, lo que supone el 69,7 y 69,2% de los costes de producción. Dentro de los costes variables destaca el importe del combustible (26,6 y 24,5% de los costes totales en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente), la mano de obra (12,4% en ambos invernaderos) y el material vegetal para el trasplante (6,3% en ambos invernaderos) ya que estas tres partidas constituyen, en conjunto, dos terceras partes de los mismos aproximadamente.

El coste total, es decir, la suma de la amortización y los costes variables, asciende a 18,48 y 18,60 € m⁻² año⁻¹ en los invernaderos tipo venlo y multitúnel respectivamente. De este coste casi un tercio corresponde al valor de las amortizaciones anuales y el resto a los costes variables (Cuadro 3.7).

Una vez determinado el coste total de producción, se ha calculado el umbral de rentabilidad como el cociente entre dicho coste y la producción de fruto comercial. Considerando que la producción obtenida durante el experimento fue de 15,8 y 15,9 kg m⁻² en los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente, el umbral resultante se sitúa en 1,17 € kg⁻¹ en ambos invernaderos (Cuadro 3.7). Estos umbrales podrían haberse reducido alargando el ciclo productivo y, consecuentemente, aumentando la producción, teniendo en cuenta que al final del experimento aún había en las plantas un número importante de frutos inmaduros que fueron catalogados como destrío. En cualquier caso, los valores umbrales obtenidos resultan considerablemente mayores que el precio medio del pimiento en Almería durante la campaña 2006/07 (0,57 € kg⁻¹) y, en menor medida, también lo son respecto al precio medio obtenido en las campañas agrícolas comprendidas entre 1999

Cuadro 3.5 Inversión, periodos de amortización y costes fijos anuales (€ m⁻²) para un cultivo de pimiento en invernadero altamente tecnificado en Almería.

CONCEPTOS	COSTE INVERSIÓN MULTITÚNEL (€ m ⁻²)	COSTE INVERSIÓN VENLO (€ m ⁻²)	PERIODO DE AMORTIZACIÓN (años)	VALOR ANUAL AMORTIZACIÓN (€ m ⁻² ·año ⁻¹)	% TOTAL INVERSIÓN MULTITÚNEL	% TOTAL INVERSIÓN VENLO	% TOTAL COSTES MULTITÚNEL	% TOTAL COSTES VENLO
Estructura multitúnel	18,00	-	20	0,90	30,1	-	4,9	-
Estructura venlo	-	45,00	30	1,50	-	52,7	-	8,1
Plástico (material y mano de obra)	1,40	-	3	0,47	2,3	-	2,5	-
Sistema de riego								
Cabezal	0,20	0,20	10	0,02	0,3	0,2	0,1	0,1
Tuberías, piquetas, etc.	1,50	1,50	10	0,15	2,5	1,8	0,8	0,8
Calefacción								
Gasificadora	1,80	1,80	20	0,09	3,0	2,1	0,5	0,5
Caldera, tuberías, etc.	10,00	10,00	10	1,00	16,7	11,7	5,4	5,4
Sist. Inyección CO ₂	1,20	1,20	10	0,12	2,0	1,4	0,6	0,6
Nebulización	3,00	3,00	10	0,30	5,0	3,5	1,6	1,6
Pantalla térmica								
Estructura pantalla térmica	3,00	3,00	10	0,30	5,0	3,5	1,6	1,6
Pantalla térmica	2,00	2,00	5	0,40	3,3	2,3	2,2	2,2
Pantalla sombreo								
Estructura pantalla sombreo	10,00	10,00	10	1,00	16,7	11,7	5,4	5,4
Pantalla sombreo	2,00	2,00	5	0,40	3,3	2,3	2,2	2,2
Canalones de recogida de drenaje	1,00	1,00	9	0,11	1,7	1,2	0,6	0,6
Sublimadores de azufre	0,40	0,40	5	0,08	0,7	0,5	0,4	0,4
Controlador climático	0,60	0,60	20	0,03	1,0	0,7	0,2	0,2
Maquinaria	1,50	1,50	10	0,15	2,5	1,8	0,8	0,8
Nivelación	1,00	1,00	30	0,03	1,7	1,2	0,2	0,2
Balsa	0,45	0,45	20	0,02	0,8	0,5	0,1	0,1
Nave	0,75	0,75	30	0,03	1,3	0,9	0,1	0,1
TOTAL	59,80	85,40		5,60/5,73	100	100	30,3	30,8

Cuadro 3.6 Costes variables (€ m²) de un cultivo de pimiento en invernadero altamente tecnificado en Almería.

CONCEPTOS	CANTIDAD MULTITÚNEL	CANTIDAD VENLO	PRECIO	COSTES VARIABLES MULTITÚNEL	COSTES VARIABLES VENLO	% TOTAL COSTES MULTITÚNEL	% TOTAL COSTES VENLO
Semillas y plántulas	3,33 ud m ²	3,33 ud m ²	0,35 € ud ⁻¹	1,17 € m ²	1,17 € m ²	6,3	6,3
Agua	702,5 L m ²	758,2 L m ²	0,15 € m ⁻³	0,11 € m ²	0,11 € m ²	0,6	0,6
Fertilizantes				0,83 € m ²	0,94 € m ²	5,0	5,0
Nitrato cálcico	0,36 kg m ²	0,37 kg m ²	0,60 € kg ⁻¹	0,22 € m ²	0,22 € m ²	1,2	1,2
Nitrato potásico	0,15 kg m ²	0,15 kg m ²	1,17 € kg ⁻¹	0,18 € m ²	0,18 € m ²	1,0	1,0
Sulfato potásico	0,13 kg m ²	0,13 kg m ²	1,00 € kg ⁻¹	0,13 € m ²	0,13 € m ²	0,7	0,7
Sulfato magnésico	0,09 kg m ²	0,09 kg m ²	0,3625 € kg ⁻¹	0,03 € m ²	0,03 € m ²	0,2	0,2
Fosfato monoamónico	0,08 kg m ²	0,07 kg m ²	2,05 € kg ⁻¹	0,16 € m ²	0,15 € m ²	0,9	0,8
Fosfato monopotásico	0,02 kg m ²	0,03 kg m ²	2,329 € kg ⁻¹	0,05 € m ²	0,06 € m ²	0,3	0,3
Microelementos	0,02 kg m ²	0,02 kg m ²	4,50 € kg ⁻¹	0,08 € m ²	0,08 € m ²	0,4	0,5
Zinc	0,001 kg m ²	0,001 kg m ²	5,88 € kg ⁻¹	0,003 € m ²	0,003 € m ²	0,02	0,02
Ácido nítrico	0,15 L m ²	0,17 L m ²	0,4354 € L ⁻¹	0,07 € m ²	0,07 € m ²	0,4	0,4
Electricidad	0,35 kW h m ²	0,32 kW h m ²	0,10 € kW h ⁻¹	0,04 € m ²	0,03 € m ²	0,2	0,2
Gas natural	12,95 m ³	12,00 m ³	0,38 € m ⁻³	4,92 € m ²	4,56 € m ²	26,6	24,5
Anhidrido carbónico	4,90 kg m ²	3,46 kg m ²	0,13 € kg ⁻¹	0,64 € m ²	0,45 € m ²	3,5	2,4
Sustrato¹	0,83 ud m ²	0,83 ud m ²	1,80 € ud ⁻¹	0,50 € m ²	0,50 € m ²	2,7	2,7
Lucha integrada				0,40 € m ²	0,40 € m ²	2,2	2,2
Mano de obra				2,30 € m ²	2,30 € m ²	12,4	12,4
Mantenimiento			1% Inversión	0,60 € m ²	0,85 € m ²	3,2	4,6
Asesoramiento técnico				0,50 € m ²	0,50 € m ²	2,7	2,7
Seguros e impuestos			1% Inversión	0,60 € m ²	0,85 € m ²	3,2	4,6
Maquinaria²				0,15 € m ²	0,15 € m ²	0,8	0,8
Otros				0,05 € m ²	0,05 € m ²	0,3	0,3
TOTAL				12,89 € m²	12,87 € m²	69,7	69,2

¹El sustrato empleado es perlita, cuya vida útil se estima en 3 años.

²Valor extraído del estudio económico realizado por Fernández-Zamudio y col. (2006) en el Pilar de la Horadada (Alicante) en invernaderos con un nivel tecnológico parecido.

y 2006 (0,68 € kg⁻¹) (Fundación Cajamar, 2007). Aunque en ambos tratamientos el valor obtenido es muy similar, hay que tener en cuenta que la inversión inicial resulta considerablemente mayor en el invernadero venlo, mientras que en el multitúnel existe un reparto más equilibrado de los costes a lo largo de la vida del proyecto, lo cual, sin duda, facilita la viabilidad de la inversión. Por tanto, desde un punto de vista estrictamente financiero la mejor opción corresponde al invernadero multitúnel.

Cuadro 3.7 Costes de producción de pimiento en cultivo altamente tecnificado en Almería.

	MULTITÚNEL	VENLO
Costes Variables	12,89 € m ⁻²	12,87 € m ⁻²
Amortización Anual	5,60 € m ⁻²	5,73 € m ⁻²
Costes Totales	18,48 € m ⁻²	18,60 € m ⁻²
Producción Comercial	15,82 kg m ⁻²	15,87 kg m ⁻²
Umbral de Rentabilidad	1,17 € kg ⁻¹	1,17 € kg ⁻¹

Aunque en un principio pueda parecer que el umbral de rentabilidad obtenido, muy superior al precio medio de venta del pimiento en Almería, hace inviable la supervivencia de explotaciones de invernadero altamente tecnificadas en esta zona, hay que tener en cuenta que el éxito o fracaso de este tipo de inversiones va a depender de la capacidad para la adecuada comercialización del producto. En este sentido cabe hacer referencia a un ejemplo característico de supervivencia en los mercados europeos, Holanda, un país en el que el sector agrario está basado en la sucesiva incorporación de tecnología con el objetivo de aumentar los rendimientos y la calidad de la producción, y cuyos productores de pimiento deben hacer frente a un umbral de rentabilidad similar al obtenido en este estudio. Por lo tanto, la clave se halla en, una vez que se han obtenido niveles elevados de cantidad y calidad de producto, así como la continuidad en la oferta, conseguir un buen canal de comercialización que permita alcanzar un alto precio acorde con la calidad ofertada, y lograr así la rentabilidad de la explotación.

CONCLUSIONES

4



4 CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio de comparación entre un invernadero multitúnel con cubierta de plástico y otro venlo con cubierta de cristal en cultivo de pimiento son las siguientes:

- Los dispositivos de control climático utilizados en los invernaderos objeto de ensayo permitieron mantener los parámetros microclimáticos programados durante la mayor parte del experimento en las condiciones de Almería.
- La transmisividad media estimada, para todo el ciclo de cultivo, a la radiación global fue 38,1 y 47,4% para los invernaderos multitúnel y venlo respectivamente.
- La producción fresca acumulada de fruto resultó semejante en ambos invernaderos ($\approx 17,6 \text{ kg m}^{-2}$ de producción total y $15,8 \text{ kg m}^{-2}$ de comercial).
- El consumo hídrico del cultivo fue ligeramente mayor en el invernadero tipo venlo, mientras que el eléctrico y el de propano lo fue en el multitúnel. El consumo de CO_2 fue considerablemente mayor en el multitúnel.
- La inversión inicial total necesaria para la puesta en marcha de una explotación con invernaderos tipo venlo sería casi un 50% superior a la de otra de similares características con invernaderos tipo multitúnel, debido a la notable diferencia existente en el coste de la estructura.
- El umbral de rentabilidad determinado para ambos invernaderos fue similar y en torno a $1,17 \text{ € kg}^{-1}$.

5 BIBLIOGRAFÍA

5 BIBLIOGRAFÍA

- Caballero, P., De Miguel, M.D. y Fernández-Zamudio, M.A. 2004. Técnicas de gestión empresarial de la producción agraria. Ed. SPUPV-1440. 161 pp.
- Castilla, N. 1994. Greenhouse in the mediterranean area: technological level and strategic management. *Acta Horticulturae*, 361: 44-56.
- Consejería de Agricultura y Pesca. 2007. Memoria de inversiones, préstamos, subvenciones y producciones 2007. Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.
- Fernández-Zamudio, M.A., Pérez, A. y Caballero, P. 2006. Costes de tecnología en invernaderos de pimiento. *Horticultura Internacional*, 51: 20-26.
- Fundación Cajamar. 2007. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería. Campaña 2006/2007. Informes y monografías (16). Edita Fundación Cajamar. 40 pp.
- Giménez, C. 1992. Bases fisiológicas de la producción hortícola. En: Nueva horticultura. Tecnología y economía de los sistemas hortícolas intensivos. Coord.: Ramos, E. y Rallo, L. Ed.: Mundi-Prensa y Universidad Hispanoamericana Santa María de la Rabida. Pp: 57-74.
- Jongschaap, R.E.E., Dueck, T.A., Marissen, N., Hemming, S. and Marcelis, L.F.M. 2006. Simulating seasonal patterns of increased greenhouse crop production by conversion of direct radiation into diffuse radiation. *Acta Horticulturae*, 718: 315-322.
- Lorenzo, P. 1996. Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernadero de *Cucumis sativus* L. en Almería. Tesis doctoral. Monografías 17/96. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. 255 pp.
- Magán, J.J., López, J.C., Cabrera, J., Pérez-Parra, J. y Baeza, E. 2005. Consumos energéticos de calefacción en invernaderos con cubierta de plástico y cristal en Almería. Actas en CD del III Congreso Nacional de Agroingeniería, León 21-24 de septiembre de 2005.

- Molina, J. 2003. El papel de la agricultura intensiva en la economía de la provincia de Almería. En: Técnicas de producción en cultivos protegidos. Coordina: Camacho, F. Editado por el Instituto Cajamar. Almería: 27-50.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia, G., Vox, G., Feuilloley, P. y Stoffers, J.A. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. Review paper. *Journal Agricultural Engineering Research*, 77(1): 7-38.
- Pérez-Parra, J. y Céspedes, A.J. 2001. Análisis de la demanda de inputs para la producción en el sector de cultivos protegidos de Almería. En: Estudio de la demanda de inputs auxiliares: Producción y manipulación en el sistema productivo agrícola almeriense. Coordina: Cuadrado, I.M. Editado por FIAPA e IFA. Almería. Pp: 1-102.
- Sanjuán, J.F. 2004. Estudio multitemporal sobre la evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería por Términos Municipales desde 1984 hasta 2004, mediante teledetección de imágenes thematic mapper de los satélites Landsat V y VII. Ed. Cuadrado, I.M. FIAPA. Almería. 100 pp.

