

EL CULTIVO EN INVERNADERO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA

Pilar Lorenzo
(IFAPA)

RESUMEN

La producción del invernadero mediterráneo está muy alejada de su potencial y el control de las variables climáticas permite actuar sobre los principales determinantes de la producción. La elección de la dotación tecnológica para el invernadero debería tender hacia la sostenibilidad del sistema productivo y los modelos biofísicos podrían ser útiles para esto.

Cualquier adaptación técnica modifica la respuesta del cultivo que, a su vez, interacciona sobre el clima del invernadero. Así, el buen funcionamiento del sistema requiere de nuevo adecuar las consignas de control.

SUMMARY

The Mediterranean greenhouse production is far away from its potential, and the control of the climatic variables can act on the main determinants of the production. The choice of technological equipment for greenhouses should be directed towards a sustainable production system and biophysical models could be useful for this.

Any technical adaptation modifies the response of the crop which in turn interacts on greenhouse climate and the proper functioning of the system requires re-adjust control set points.

1. Introducción

La horticultura intensiva del mediterráneo presenta un alto potencial productivo originado fundamentalmente por los niveles de radiación que se alcanzan en la zona. El potencial puede ser aprovechado en la medida que se adecuan otros determinantes. Por tanto, la radiación absorbida por el cultivo debe ser convertida de forma eficiente en los asimilados que forman parte del tejido vegetal y particularmente de los órganos de interés comercial. La incorporación de tecnología en el invernadero permite mejorar esta eficiencia al modificar y controlar el valor de los parámetros climáticos que inciden sobre el cultivo (radiación, temperatura, déficit de presión de vapor, concentración de CO₂, velocidad de viento), el aporte hídrico y mineral, la duración del periodo productivo, el control de plagas y enfermedades, etc.

La horticultura del mediterráneo actualmente se desarrolla en invernaderos poco tecnificados, carentes de control activo y de bajo consumo energético. En consecuencia, los resultados productivos están sujetos a la evolución del clima local por lo que se alejan considerablemente de su potencial, obteniéndose producciones relativamente bajas que se acumulan en determinados periodos, pérdidas de calidad de los frutos y ciclos de cultivo cortos debido al deterioro precoz de las plantas por la ausencia de control de las variables climáticas, la incidencia de plagas y enfermedades o la utilización de aguas de calidad deficiente. El reto de la horticultura en esta latitud está en elegir la tecnología adecuada para incrementar la producción y obtener productos de calidad y seguros, adoptando un sistema de cultivo sostenible, basado en el aprovechamiento óptimo de la energía solar disponible en la zona que, a la vez, permita reducir en la medida de lo posible: el uso de los recursos naturales y de las energías no alternativas, la generación de residuos y, en definitiva, el impacto sobre el medioambiente.

Por otra parte, la incorporación en el invernadero de innovaciones técnicas (nuevos materiales, dispositivos de control), las mejoras en el manejo de cultivo y la utilización de variedades más productivas que presentan mayores tasas fotosintéticas con índices de cosecha más altos o aquellas mejor adaptadas o de mayor eficiencia en el uso de la radiación permiten superar paso a paso la producción potencial. Aunque conviene considerar que la implementación en el invernadero de nuevas innovaciones técnicas modifica la respuesta de la planta que, a su vez, interacciona con el clima del invernadero y, por tanto, se requieren generalmente cambios en los valores de las consignas de control. Los modelos biofísicos pueden ser herramientas útiles para predecir estas variaciones.

2. La respuesta del cultivo a las variables climáticas y su interacción

La producción de un cultivo es el resultado de un proceso complejo, integrado por diferentes subprocesos cuyos cambios se manifiestan a distinta escala temporal. A corto plazo, la producción depende fundamentalmente de la disponibilidad de asimilados para la formación de materia seca, es decir del balance neto de carbono (diferencia entre la ganancia por fotosíntesis y la pérdida por respiración) y, a largo plazo, de la acumulación de materia seca y de su distribución hacia los frutos (Challa *et al.*, 1995).

El ambiente donde se desarrollan las plantas condiciona el resultado productivo al influir a corto plazo sobre la producción de asimilados, y a largo plazo, fundamentalmente, sobre el crecimiento del área foliar y su estructura espacial, factores que intervienen decisivamente en la absorción de radiación por el cultivo. Los parámetros climáticos también inciden sobre el balance fuente/sumidero de la planta, relación que determina el patrón de distribución de asimilados, y ejercen una gran influencia sobre la calidad de los frutos que, junto al peso fresco, da lugar al rendimiento de los cultivos. Por tanto, es conveniente conocer en primer lugar la respuesta de los cultivos a las variaciones de las variables climáticas para optimizar la eficiencia de los procesos que intervienen en el crecimiento y desarrollo del fruto.

3. Radiación

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por los cultivos, como fuente de la fotosíntesis, es uno de los principales determinantes de la producción. En el invernadero este factor depende de:

- La radiación incidente, subordinada a la latitud y variable a lo largo del ciclo anual; el régimen de nubosidad, y la contaminación del aire.
- La transmisión de radiación a través de la cubierta es un parámetro sujeto a las variaciones de la posición solar que modifican el ángulo de incidencia de la radiación sobre la cubierta a lo largo del día y de la estación anual. La adecuación de la geometría de cubierta para mejorar el ángulo de incidencia de la radiación es una estrategia que permite el aprovechamiento de la radiación

disponible. Los resultados de los estudios llevados a cabo sobre la orientación y ángulo de la cubierta del invernadero para optimizar la radiación incidente sobre los cultivos en la costa del mediterráneo han llevado a proponer a Soriano (2002) el prototipo con 27 °C de pendiente en ambas vertientes de la cubierta (sur/norte) y la orientación este-oeste como los parámetros más adecuados para esta localización geográfica, en la propuesta se valora el coste de la construcción y las prestaciones. Cabrera (2010) ha caracterizado y modelizado las componentes directa y difusa de la radiación solar incidente y transmitida en los invernaderos de la zona.

La reducción de la transmisión de radiación debida a la acumulación progresiva de polvo, polen y suciedad repercute considerablemente más en climas secos de escasa pluviometría, siendo en estas áreas uno de los principales factores de variación. También el envejecimiento del material de cubierta depende de las características del propio material y su deterioro se ve influido por las condiciones climáticas. La eventual condensación del vapor de agua, especialmente cuando el ángulo de cubierta es inferior a 30° y no favorece el deslizamiento de las gotas de agua también puede afectar a la reducción de la radiación transmitida, aunque este efecto puede ser contrarrestado parcialmente por su capacidad de difusión. Los elementos estructurales opacos y mallas anti-insecto que protegen las ventanas cenitales reducen la radiación que incide sobre el cultivo y contribuyen a incrementar su distribución heterogénea sobre el dosel vegetal.

Se ha avanzado en el desarrollo de materiales de cubierta de alta capacidad de difusión de la radiación. La radiación difusa es adireccional y genera mayor uniformidad espacial dentro del invernadero, algunos autores han descrito que el aumento de la fracción difusa aumenta la radiación absorbida por el cultivo (Warren Wilson *et al.*, 1992), la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) (Cockshull *et al.*, 1992) y la productividad del cultivo (Hemming *et al.*, 2008). Sin embargo, cuando se compara la transmisión de radiación entre materiales transparentes y con alta capacidad de difusión, en general, el coeficiente de transmisión de la radiación es menor en los difusos, aunque se ha observado una mayor proporción en la reducción de la radiación global respecto a la PAR. Por otra parte, el análisis de cubiertas difusoras, mediante modelos que estiman

la radiación absorbida por el dosel vegetal distribuido en líneas, predice que las cubiertas difusoras no presentan ventaja cuando el cultivo está espaciado y tiene un bajo LAI (Índice de Área Foliar) (Heuvelink y González-Real, 2007).

- La variación del marco de cultivo y de la densidad de planta en función del ciclo estacional, permite optimizar la intercepción de la radiación por el cultivo, así por ejemplo, un cultivo de tomate en Holanda se dispone a una densidad de 2,5 plantas. m² y en verano habitualmente se incrementa la densidad de tallos hasta 3,75 tallos. m² (Heuvelink *et al.*, 2008).
- El índice de área foliar (Figura 1) y la estructura del dosel vegetal o distribución espacial de los órganos aéreos de la planta determinan la intercepción de radiación. Las hojas y demás órganos fotosintetizadores sirven como colectores de radiación e intercambiadores de gases, los tallos soportan estas estructuras de forma que el intercambio radiativo y convectivo tenga lugar con eficacia (Lorenzo, 1996).

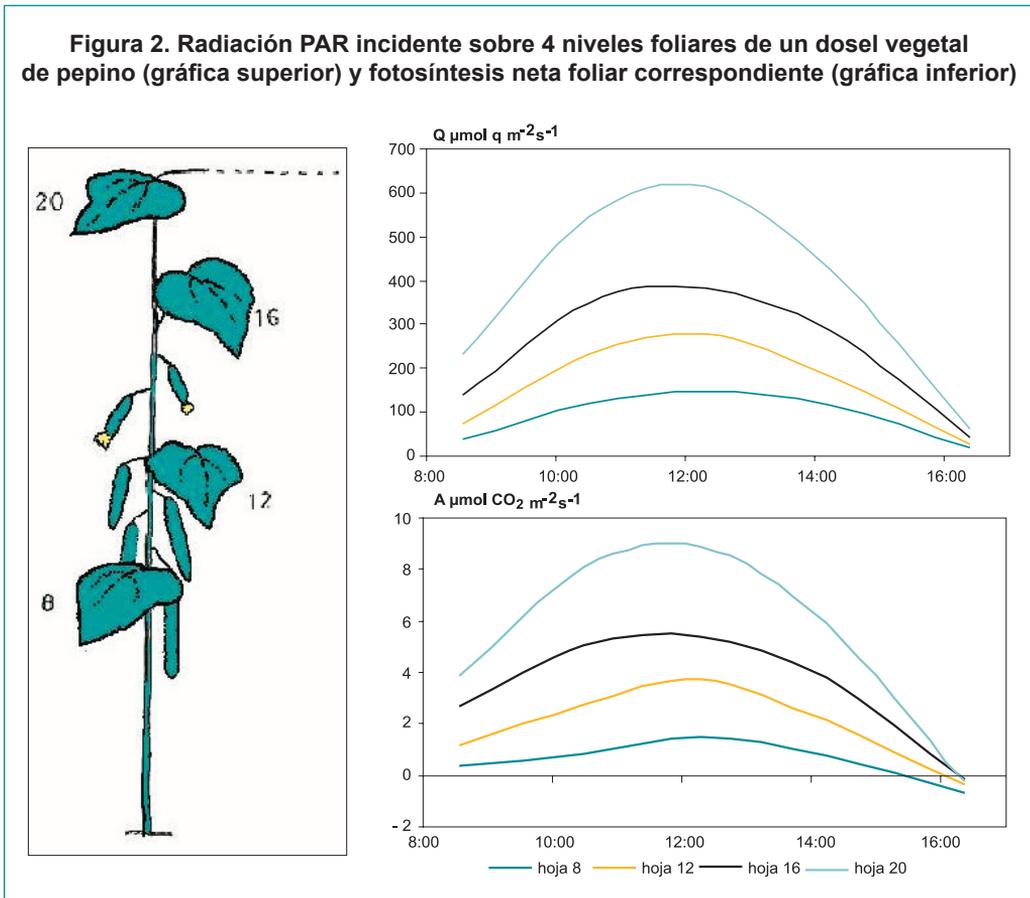
La relación entre la intensidad de radiación PAR y la asimilación neta del dosel vegetal en las especies de alta saturación lumínica, como las plantas hortícolas, indica que la fotosíntesis neta no llega a la saturación incluso a los niveles máximos de radiación que se pueden alcanzar al mediodía solar en un día despejado del solsticio de verano (1.400 mmol q m⁻² s⁻¹ en el interior del invernadero) (Lorenzo *et al.*, 2003). Por tanto, para el cultivo protegido, la radiación es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, particularmente durante el periodo próximo al solsticio de invierno. Esto

Figura 1. Evolución del Índice de Área Foliar. Cultivo de pimiento



es así debido a que, aunque la fotosíntesis neta a nivel foliar alcanza la saturación a intensidades de radiación entre 1.200 y 1.400 $\mu\text{mol q m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la radiación se extingue a través del dosel vegetal, de forma que los niveles foliares inferiores reciben intensidades de radiación muy bajas y apenas contribuyen al balance global del carbono de la planta, por el contrario, la fracción superior del dosel vegetal absorbe un porcentaje alto de la radiación y es responsable en gran medida del crecimiento y desarrollo de la planta y de su mantenimiento (Figura 2).

Figura 2. Radiación PAR incidente sobre 4 niveles foliares de un dosel vegetal de pepino (gráfica superior) y fotosíntesis neta foliar correspondiente (gráfica inferior)



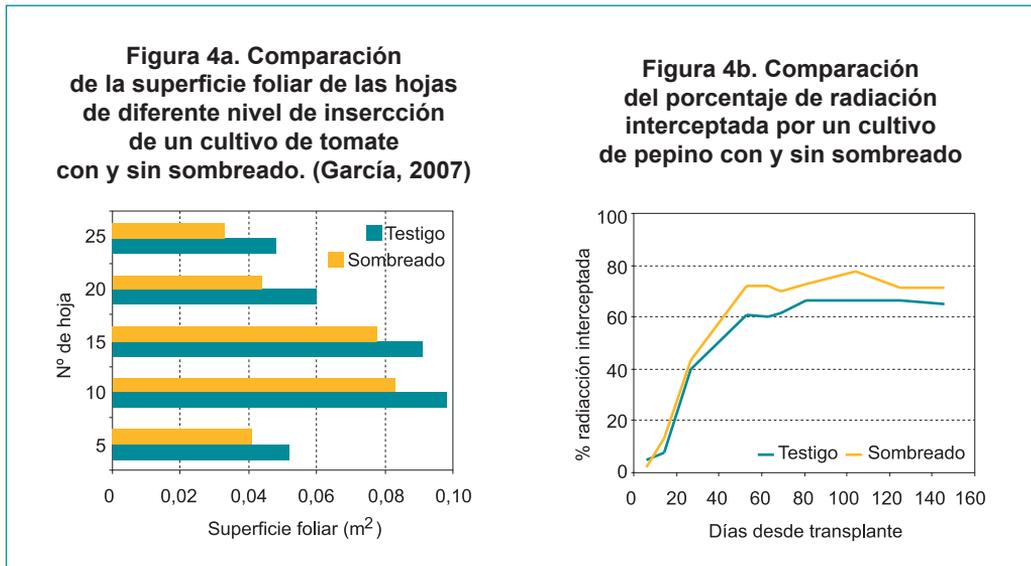
Acock *et al.*, 1978 estudiaron la contribución a la fotosíntesis de las hojas de diferente nivel foliar de un dosel de plantas de tomate y observaron que la conductancia a la transferencia de CO₂ y la tasa de respiración de las hojas de la parte alta era aproximadamente 10 veces superior a aquellas situadas en la parte inferior.

La arquitectura del dosel vegetal y el coeficiente de extinción de la radiación (**k**) intervienen sobre la eficiencia de la intercepción de la radiación. El dosel vegetal de pepino y tomate tienen coeficientes de extinción alrededor de 0,7-0,8 y 0,5-0,7 respectivamente, lo que significa que las hojas de las plantas de pepino tienen una estructura planófila y absorben la mayor parte de la radiación en el estrato superior del dosel vegetal, mientras que las hojas superiores de la planta de tomate permite que los estratos foliares inferiores reciban algo más de radiación (Figura 3).

El coeficiente de extinción de la radiación de un cultivo varía al hacerlo la morfología de la planta que presenta gran plasticidad respecto a las condiciones ambientales y al manejo de cultivo. Por ejemplo, el sombreado aumenta el coeficiente de extinción de la radiación ya que genera hojas de mayor superficie foliar (Figura 4a) que interceptan proporcionalmente más radiación (Figura 4b); por el contrario, el uso de soluciones nutritivas de moderada salinidad reduce la expansión foliar y también el coeficiente de extinción **k**, por lo que el nivel foliar inferior de los cultivos regados con disoluciones de mayor potencial osmótico reciben mayor intensidad de radiación, esto puede contribuir a compensar la reducción de la radiación interceptada como consecuencia de la menor expansión foliar.

Figura 3. Comparación de la morfología y la disposición foliar del dosel vegetal de tomate y pepino. Influencia sobre el coeficiente de extinción de la radiación





El análisis de la evolución de las variables del clima mediterráneo pone en evidencia que durante gran parte del periodo anual se necesita evacuar calor desde el interior del invernadero. Por ello, en primer lugar deben adecuarse la densidad y el marco de plantación, permitiendo que la transpiración del cultivo actúe eficazmente refrigerando la atmósfera del invernadero. Se considera que la transpiración de un dosel vegetal desarrollado puede disipar entre el 50-60 % del calor del invernadero.

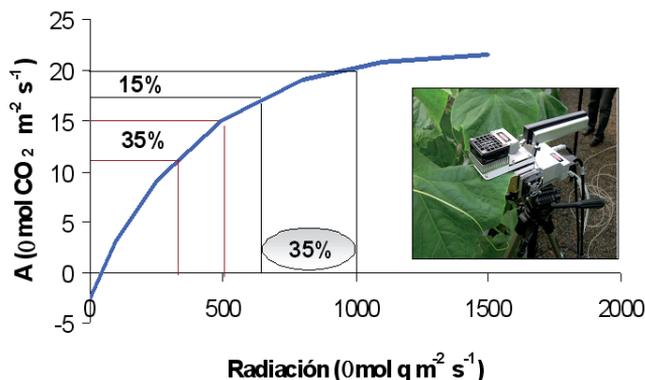
La ventilación natural es un sistema de refrigeración fundamental en el invernadero mediterráneo, sin embargo, actualmente las estructuras están dotadas de sistemas de ventilación poco eficientes (Baeza *et al.*, 2010) y prácticamente la mayoría de los productores recurren a sombreado la cubierta mediante el blanqueo (Céspedes *et al.*, 2009).

La calidad de fruto es un parámetro muy sensible al rigor térmico y el que aconseja el empleo del sombreado cuando la ventilación natural es insuficiente, aún a expensas de una irremediable pérdida de producción. En numerosas condiciones, se ha demostrado que la producción potencial disminuye proporcionalmente a la reducción de iluminación. Reducciones del 1 % en radiación suponen reducciones entre el 0,5 y el 3,1 % en la producción de tomate (Cockshull, 1988,1989). La Figura 5 muestra el efecto del sombreado fijo sobre la fotosíntesis neta foliar para diferentes intensidades de radiación PAR, la relación indica que para un mismo porcentaje de reducción de PAR (35 %) el

efecto sobre la disminución de la asimilación neta es superior para intensidades bajas de radiación y sugiere que la mayor reducción de la actividad fotosintética producida por el sombreado fijo de la cubierta del invernadero se podría asociar a los periodos del día de baja radiación, cuando no es necesario reducir la energía que incide sobre la cubierta del invernadero.

De Pascale y Stanghellini (2011) han estimado que cada 10 % de sombreado en los invernaderos donde se cultiva tomate en el área de Nápoles, durante el periodo entre mayo y julio, genera una pérdida de producción potencial en torno a $0,6 \text{ kg m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$. A pesar de esto, el sombreado del invernadero mediterráneo poco tecnificado, se muestra como un método sostenible para acondicionar el clima del invernadero y en mayor medida, en los casos que el sistema de ventilación resulta insuficiente para alcanzar las temperaturas que requiere la obtención de frutos de calidad. El sombreado contribuye a reducir las fisiopatías, como la necrosis apical de fruto y aumenta considerablemente la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes, esto es particularmente interesante allí donde el agua es un recurso escaso. Cuando se dispone de sombreado móvil, el manejo preciso de las consignas de activación del sombreado es fundamental para obtener los mejores resultados productivos. En este sentido es primordial modificar las consignas de activación a lo largo del desarrollo del cultivo para sacar partido de la plasticidad de la planta, dado que su morfología foliar varía en función del sombreado y por tanto también el porcentaje de radiación interceptada (Lorenzo *et al.*, 2010).

Figura 5. Influencia del sombreado sobre la asimilación neta de CO_2



Las cubiertas plásticas termosensibles que pueden modificar la transmisión de radiación paso a paso cuando el material alcanza las temperaturas predeterminadas, se muestran como un avance técnico interesante, actualmente en desarrollo, que podría ser una alternativa muy ventajosa respecto al habitual encalado de la cubierta.

3. Temperatura

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y del crecimiento y desarrollo de los vegetales. La distribución biogeográfica original de las hortalizas comestibles tiene lugar en latitudes subtropicales, generalmente asociadas a regímenes térmicos poco variables y temperaturas mínimas superiores a 12 °C, límite considerado como el mínimo, por debajo del cual, estas especies ralentizan el crecimiento y presentan síntomas de deterioro. Por tanto, la ausencia de control térmico cuando la temperatura se sitúa por debajo de estos niveles impide la programación de las cosechas y se generan amplias variaciones en la cantidad y calidad de la producción, al mismo tiempo, los cambios en la actividad metabólica, a veces bruscos, pueden inducir el envejecimiento precoz de las plantas y por tanto reducción de su potencial productivo.

Verlody (1990) establece el umbral de las temperaturas mínimas nocturnas entre 15-18,5 °C, por debajo de las que se necesitaría incorporación de calor para los cultivos de tomate, pimiento, pepino, melón y judía. Van de Vooren y Challa (1981) sitúan 12 °C como límite nocturno mínimo para el cultivo de pepino en la optimización dinámica del control climático en invernadero; también Zabeltitz (1992) sugiere 12 °C como límite, por debajo del cual sería necesario aportar calor al invernadero.

El metabolismo está profundamente afectado por los cambios de temperatura medioambiental, es complicado conocer la incidencia de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos desde un punto de vista global, dado que intervienen diferentes procesos (división celular, expansión, asimilación de carbono, respiración, distribución de asimilados...) y cada uno de ellos tiene un determinado rango óptimo de temperatura, característico de la especie que se considera, de su fase de desarrollo y de las condiciones previas de crecimiento. Se sabe que los procesos de expansión foliar son térmicamente muy dependientes, por lo que las temperaturas bajas inciden más negativamente sobre plantas jóvenes durante la fase de crecimiento y desarrollo del dosel vegetal.

La actividad fotosintética tiene su óptimo en un amplio rango de temperatura, aunque el balance neto disminuye al aumentar ésta debido al consecuente aumento de la respiración. Sin embargo, el aumento de la temperatura entre 5 y 10 °C por encima del óptimo puede producir un impacto notable sobre fotosíntesis neta, aunque existen diferencias notables entre genotipos tolerantes y sensibles al estrés térmico por alta temperatura, en los últimos se ha observado reducción de la fotosíntesis neta asociada a alteración del Fotosistema II y a deterioro en la membrana plasmática (Camejo *et al.*, 2005).

La temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de tomate se sitúa entre 18 y 25° (Heuvelink y Dorais, 2005). La reducción en el crecimiento se asocia a la disminución de la fotosíntesis neta y de la translocación y distribución de asimilados. Cuando se superan estos valores la pérdida de producción potencial depende en gran medida del tiempo de exposición a altas temperaturas. De Pascale y Stanghellini (2011) han concluido, al revisar diversos estudios, que la fase generativa del cultivo es más sensible al exceso térmico que la fase vegetativa, que el peso del fruto lo es menos que el número de frutos, y que la reducción en la producción de frutos se debe a: el menor número de frutos formados, la duración más corta del crecimiento del fruto y a la inhibición de la asimilación de carbohidratos.

Las altas temperaturas producen desórdenes fisiológicos en los frutos como la reducción del cuajado, Sato *et al.* (2000) indican que la liberación del polen y su viabilidad pueden ser los factores más determinantes en el cuajado de fruto a altas temperaturas. Otras alteraciones producidas por la temperatura elevada son la formación de frutos partenocárpicos, la maduración prematura del fruto, o la maduración desigual caracterizada por la presencia de zonas verdes sobre la pared del fruto y de zonas suberosas oscuras bajo la piel que se asocia a niveles bajos de radiación contrastando con temperaturas excesivas (FAO, 1988).

La calidad del fruto es muy sensible a las altas temperaturas. Cuando se superan los 26-30 °C se observan alteraciones en diversos parámetros de calidad como el color del fruto de tomate, la textura y las características organolépticas. (Adams *et al.*, 2001; Muholland *et al.*, 2003; Saltveit, 2005; Fleisher *et al.*, 2006). Por lo tanto, el control de la temperatura en el invernadero basada en los niveles de consigna que determinan los frutos de buena calidad durante la fase generativa es fundamental para mejorar la productividad.

4. Déficit de presión de vapor

La ausencia de control climático en el invernadero mediterráneo produce grandes variaciones diarias de la humedad relativa. Es habitual pasar en un mismo día desde el punto de rocío a una humedad relativa del 30 % o de un déficit de presión de vapor de 0,2 kPa durante la noche a valores superiores a 3 kPa al mediodía solar. Las situaciones extremas que originan elevado déficit de presión de vapor entre las hojas y el aire suelen presentarse los días de alta insolación, especialmente al inicio del cultivo y pueden alcanzarse DPV próximos a 5 kPa, sucede cuando el índice de área foliar del cultivo es bajo y por tanto también su capacidad de disipar el calor a través de la transpiración (Lorenzo *et al.*, 2003). A medida que aumenta el LAI, el DPV del ambiente se sitúa dentro de unos valores más bajos y por tanto menos estresantes. En el invernadero la principal fuente de vapor de agua es la transpiración de cultivo.

El contenido de humedad de la atmósfera incide sobre: el turgor celular, la expansión foliar, el crecimiento y desarrollo aéreo y radicular de la planta, la transpiración del cultivo, la absorción de nutrientes y la producción de materia seca.

Las condiciones de alta demanda evaporativa pueden originar desequilibrio hídrico en las plantas, cuando la demanda hídrica del ambiente supera la absorción de agua por el sistema radicular, si este es incapaz de abastecer las exigencias ambientales. Este efecto, se agudiza y puede llegar a ser drástico cuando el sistema radicular está mermado por variaciones en la distribución de asimilados, especialmente durante la fructificación, como se ha descrito para el cultivo de tomate (Hurd, 1978). Después de noches frías, seguidas de días despejados, se puede observar un marchitamiento foliar, expresión de un severo déficit hídrico; en estas situaciones se aconseja disminuir la radiación incidente. La reducción de la absorción de agua por las raíces frías se debe a una reducción de la conductancia hidráulica.

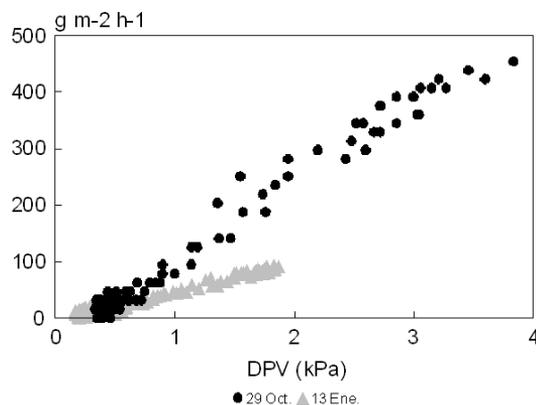
Cuando el DPV es alto, la elevada transpiración por área foliar o el efecto directo del DPV pueden reducir la conductancia estomática y la fotosíntesis neta. Esta respuesta representa un comportamiento conservador propio de numerosas especies con el fin de evitar la deshidratación irreversible de la planta. Sin embargo, resultados obtenidos de experiencias desarrolladas en cultivo de pepino indican que estas plantas mantienen altas tasas de transpiración, aún a DPV elevados en torno a 3 kPa (Figura 6), probablemente debido a procesos de aclimatación a estos regímenes hídricos rigurosos desde estadios

iniciales de su desarrollo y/o al efecto “*feed-back*” producido por un cierre estomático parcial elevando el $DPV_{\text{hoja-aire}}$. Sin duda, debe promoverse un manejo del cultivo que favorezca la formación de plantas equilibradas con un sistema radicular bien desarrollado.

Los ambientes con alta demanda hídrica se han asociado a la aparición de desórdenes fisiológicos como la necrosis apical en tomate y pimiento. Esta fisiopatía, que tiene una considerable repercusión económica, está relacionada con una restricción del transporte de calcio hacia la zona distal del fruto de tomate y pimiento. En atmósferas de baja demanda evaporativa se genera como resultado de la reducida transpiración, sin embargo, en el área mediterránea esta sintomatología se desencadena más frecuentemente por el uso de agua de riego de moderada salinidad, coincidiendo con regímenes de alta radiación y demanda hídrica ambiental. La fisiopatía se desarrolla, al reducirse el flujo hídrico y mineral desde la raíz hacia el fruto como consecuencia de la disminución del gradiente de potencial hídrico entre estos órganos.

Las atmósferas húmedas próximas a la saturación propician: reducción de la tasa de transpiración, disminución del transporte de iones hacia las zonas de crecimiento y desequilibrio hormonal. Estas alteraciones pueden incidir en el crecimiento y desarrollo y provocar morfologías anormales y fisiopatías. El control de una higrometría excesiva en el interior de las estructuras de cultivo es un método para la prevención de enfermedades criptogámicas.

Figura 6. Relación entre la transpiración por superficie foliar y el DPV de un cultivo de pepino. La relación se muestra en dos fases fenológicas diferentes



5. Concentración de dióxido de carbono

El contenido de carbono (C) en el tejido vegetal representa alrededor del 40 % de la materia seca. El carbono procede del dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y se incorpora al tejido vegetal a través del proceso de la fotosíntesis, por tanto, se puede afirmar que el CO_2 es una de las principales fuentes de la fotosíntesis. En la atmósfera actual, la concentración de CO_2 está en torno a $385 \mu\text{mol mol}^{-1}$, mientras que la concentración óptima para la fotosíntesis se sitúa entre $900\text{-}1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$, lo que significa que la tasa de asimilación de carbono potencial está muy limitada por la actual concentración de CO_2 atmosférico.

El invernadero es un recinto semicerrado en el que la actividad fotosintética de las plantas da lugar a un régimen fluctuante de CO_2 . Estudios llevados a cabo en los invernaderos mediterráneos han cuantificado que durante el 60 % del periodo de iluminación, la concentración de CO_2 dentro del invernadero, es inferior a la exterior. Se han registrado reducciones de la concentración de CO_2 del 55 % y del 47 % en cultivos con el dosel vegetal desarrollado en ciclos de primavera y de otoño respectivamente (Sánchez-Guerrero, 1999 ; Alonso, 2011). El agotamiento tiene lugar en mayor o menor medida fundamentalmente en función de dos parámetros, la radiación que intercepta el cultivo que, a su vez, es dependiente de la radiación incidente y del LAI y la renovación de aire del invernadero. La necesidad de incorporar mallas anti-insecto para el control de plagas y enfermedades reduce la ventilación y dificulta el restablecimiento de la concentración de CO_2 dentro del invernadero.

Cuando se analiza la respuesta de la fotosíntesis neta a la variación de la concentración de CO_2 , se observa que la concentración ambiental se sitúa en la pendiente máxima de esta relación, lo que significa que cualquier aumento o disminución de la concentración de CO_2 origina un cambio muy notable sobre la asimilación neta.

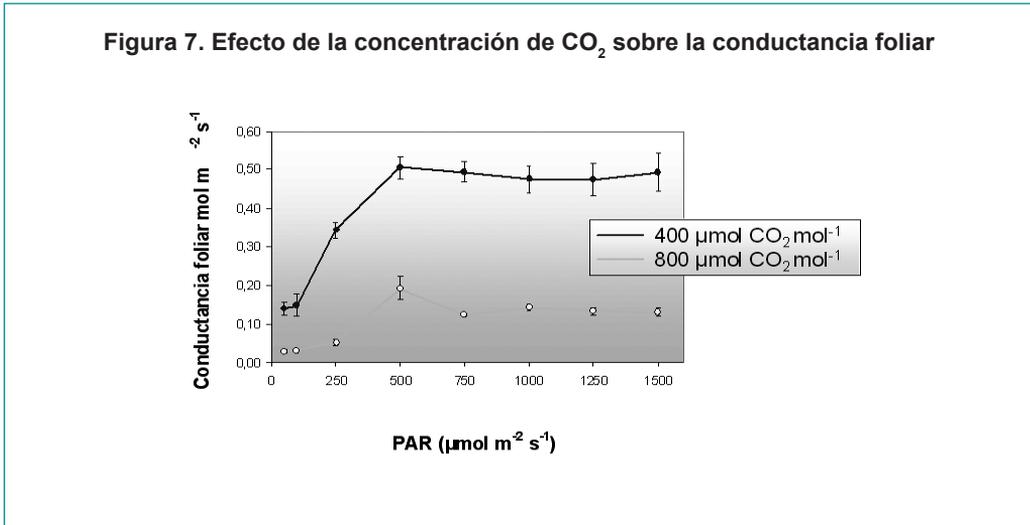
Una primera medida para paliar el agotamiento de CO_2 es optimizar la ventilación natural del invernadero. Aún con esto, cuando la actividad fotosintética de las plantas en el invernadero es alta (dosel vegetal bien desarrollado y alta radiación), puede no alcanzarse el valor exterior. Registros continuos realizados en un invernadero dotado de ventilación pasiva durante todo el ciclo de producción, indican que la concentración de CO_2 más habitual, analizada por clases de frecuencia, es de 250 a $300 \text{ mmol mol}^{-1}$ durante el periodo de iluminación (Sánchez-Guerrero *et al.*, 2005).

Estas circunstancias han puesto en evidencia el interés de valorar la aplicación de enriquecimiento carbónico teniendo en cuenta las características de los sistemas productivos del área mediterránea en los que la ventilación natural funciona durante la mayor parte del periodo productivo. Las experiencias realizadas en invernaderos dotados de equipos para el control climático han permitido establecer una estrategia dinámica vinculada a la ventilación del invernadero y al régimen de viento, consistente en enriquecer la atmósfera del invernadero aproximadamente al doble de la concentración exterior ($700\text{-}800\text{ mmol mol}^{-1}$) cuando las ventanas permanecen cerradas y próxima a la ambiental ($350\text{-}375\text{ mmol mol}^{-1}$) cuando opera la ventilación ya sea por exceso térmico o higrométrico, con objeto de reducir el gradiente interior/externo y evitar pérdidas innecesarias (Lorenzo, 1996). En los ciclos de primavera la ventilación permanece activa buena parte del día con objeto de controlar la temperatura y la humedad, por lo que la incorporación de CO_2 es menor que en el ciclo de invierno, como consecuencia también lo es su efecto, los resultados que se han obtenido en este sentido, están en la línea de las observaciones de Nederhoff (1994) quien argumenta que la respuesta productiva obtenida guarda relación directa con la cantidad de dióxido de carbono aportado.

Bajo las condiciones mediterráneas, los estudios llevados a cabo para evaluar la respuesta del enriquecimiento carbónico sobre la producción, muestran que la aplicación de CO_2 con la estrategia mencionada, da lugar a incrementos productivos de: 15 % en un cultivo de tomate cherry, 17 % en judía, 17 % en pepino y 17 % en pimiento. El incremento de producción en estos cultivos se debe fundamentalmente al incremento de la fracción de fruto (Sánchez-Guerrero, *et al.*, 2005; Alonso 2011).

Estos resultados responden a experimentos llevados a cabo durante los ciclos de otoño-invierno, sin actuación del sistema de calefacción, en los que se ha controlado la ventilación natural y la aplicación de CO_2 . Stanghellini *et al.*, 2008 han argumentado el menor coste de aplicación de enriquecimiento carbónico que de calefacción para obtener un incremento productivo similar en invernadero mediterráneo. El control de las temperaturas mínimas induce un efecto sinérgico al incrementar la producción obtenida con el aporte de CO_2 , (Lorenzo, 2001).

A nivel foliar el aumento de la concentración de CO_2 reduce la conductancia foliar (Figura 7). Sin embargo, cuando se analiza el efecto a escala de dosel vegetal el efecto sobre la absorción hídrica pierde relevancia y la reducción de la absorción hídrica en los cultivos enriquecidos con CO_2 es ligeramente inferior (3-5 %) respecto a los cultivos de



referencia. La aplicación de CO₂ aumenta la eficiencia en uso del agua (WUE) y de los fertilizantes. Estos incrementos, en los cultivos hortícolas, se deben en mayor medida al aumento de la producción y en menor medida a la reducción de la absorción hídrica por el cultivo. Se han obtenido incrementos de la WUE en torno al 40 % en el cultivo de pepino (Sánchez-Guerrero *et al.*, 2009) y del 25 % en el cultivo de pimiento (Alonso, 2011).

Otro aspecto a considerar en relación a la aplicación de enriquecimiento carbónico en los invernaderos es su influencia sobre el efecto negativo de la salinidad. La reducción lineal de la producción de fruto que se produce a partir de un valor umbral de salinidad (Maas y Hoffman, 1977) depende del cultivo, de su estado de desarrollo, así como de las condiciones climáticas en las que se desarrolla. Los efectos nocivos de la salinidad dependen del clima incidente y pueden paliarse mediante la actuación de sistemas para el control del clima (Li, 2000). En relación al enriquecimiento carbónico, la influencia se produce principalmente a través del aumento en la disponibilidad de asimilados (Ho, 2003). El aumento de la tolerancia a la salinidad mediante la aplicación de CO₂ se ha evaluado en cultivo de tomate en invernadero de cristal, obteniendo un incremento del umbral de conductividad eléctrica de la solución en el entorno radicular en relación al crecimiento de la planta (Maggio *et al.*, 2002) y una reducción de la pérdida productiva de producción de plantas regadas a 7 dS m⁻¹ al aumentar la [CO₂] a 1.200 μmol mol⁻¹ sin afectar a la calidad (Li *et al.*, 1999).

El aumento de la concentración de CO₂ representa un incremento de la fuente fotosintética y esto ha suscitado el interés en analizar este efecto sobre el crecimiento de la fuerza de sumidero. Alonso (2011) ha estudiado el enriquecimiento carbónico en el cultivo de pimiento con una densidad de 5 y 7,5 tallos m⁻², el incremento de la producción comercial respecto a los cultivos de referencia ha sido 17 y 20 % respectivamente.

6. Consideraciones finales

Aumentar la actual producción en el invernadero mediterráneo de forma sostenible implica hacer una elección de la tecnología disponible y de las nuevas innovaciones técnicas para acceder al control del sistema de producción. Los modelos biofísicos pueden ser herramientas útiles para abordar esta tarea. Las incorporaciones técnicas en el invernadero modifican la morfología de las plantas que presenta una gran plasticidad, el balance fuente-sumidero, las respuestas de los procesos de intercambio gaseoso, etc. La interacción de estos cambios con el clima del invernadero requiere nuevas consignas para el control de las variables climáticas, del aporte de riego y mineral y en general del manejo del cultivo.

Referencias Bibliográficas

- Acock, B.; Charles-edwards, D. A.; Fitter, D. J.; Hand, D. W.; Ludwig, J.; Warren wilson, J.; Withers, A. C. (1978): "The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy model"; *Journal of Experimental Botany*, 29(111); pp. 815-827.
- Adams, S. R.; Cockshull, K. E.; Cave, C. R. J. (2001): "Effect of temperature on Growth and Development of Tomato Fruits"; *Annals of Botany*, (88); pp. 869-877.
- Alonso, F. J. (2011): *Efecto del enriquecimiento carbónico sobre la bioproduktividad y la absorción hídrica y mineral del cultivo de pimiento*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. pp. 179.

- Baeza, E.; Pérez-Parra, J. J.; López, J. C.; Gázquez, J. C. (2010): "Ventilación natural"; Sánchez-Guerrero, M.C.; Alonso, F.J.; Lorenzo, P.; Medrano, E. (eds.): *Manejo del clima en el invernadero Mediterráneo*. IFAPA; pp. 13-35.
- Céspedes, A. J.; García, M. C.; Pérez-Parra, J. J.; CUADRADO, I. M. (2009). *Caracterización de la explotación protegida de Almería*. FIAPA y Fundación Cajamar; pp.177.
- Challa, H., Heuvelink, E., Van Meeteren, U. (1995.) "Crop growth and development"; Bakker, J. C.; Bot, G. P. A.; Challa, H.; Van De Braak, N. J. *Greenhouse climate control: An integrated approach*. (Ed.): Wageningen Pers. Netherlands; pp. 62-84.
- Cockshull, K. E. (1988): "The integration of plant physiology with physical changes in greenhouse climate"; *Acta Horticulturae*, (229); pp.113-123.
- Cockshull, K. E. (1989): "The influence of energy conservation on crop productivity"; *Acta Horticulturae*, (245); pp. 530-536.
- Cockshull, K. E.; Graves, C. G.; Cave, G.; Carol, R. J. (1992): "The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes"; *J. Hort. Science*, (67)1; pp. 11-24.
- De Pascale, S.; Stanghellini, C. (2011): "High Temperature Control in Mediterranean Greenhouse Productio: the Constraints and the Options"; *Acta Horticulturae*, (893); pp. 103-116.
- Cabrera, F. J. (2010): *Caracterización y modelización de las componentes directa y difusa de la radiación solar en invernaderos*. Tesis doctoral. Universidad de Almería; p. 291.
- Camejo, D.; Rodríguez, P.; Morales, M. A.; Del'Amico, J. M; Torrecillas, A.; Alarcón, J. J. (2005): "High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility"; *Journal of Plant Physiology*, (162); pp. 281-289.

- FAO. (1988): *Cultures protégées en climat méditerranéen. Production végétale et protection des plantes*; pp.90-317.
- Fleisher, D. H.; Logendra, L. S.; Moraru, C.; Both, A.; Cavazzoni, J.; Gianfagna, T.; Lee, T.; Janes, H. W. (2006): "Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling"; *Hort, J.; Science and Biotech*, (81)1; pp. 125-131.
- García, M. L. (2007): *Refrigeración de invernadero: Influencia sobre la Bio-productividad y la eficiencia en el uso del agua en un cultivo de tomate en sustrato sometido a distintos niveles de salinidad*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. pp. 291.
- Hemming, S.; Dueck, T. A.; Janse, J.; Van Noort, F. (2008): "The effect of diffuse light on crops"; *Acta Horticulturae*, (801); pp. 1.293-1.300.
- Heuvelink, E.; Dorais, M. (2005): "Crop Growth and Yield". Heuvelink. E. (ed.): *Tomatoes*. CABI Publishing. Cambridge. USA. pp. 85-143.
- Heuvelink, E.; González-Real, M. M. (2008): "Innovation in Plant-Greenhouse Interactions and Crop Management"; *Acta Horticulturae* (801); pp. 63-74.
- Ho, L. C. (2003): "Interactions between root and shoot environmental factors on crop yield and quality"; *Acta Horticulturae* (609). pp.121-126.
- HURD, R. G. (1978): "The root and its environment in the nutrient film technique of water culture"; *Acta Horticulturae*, (82); pp. 87-97.
- Li, J. H.; Sagi, M.; Gale, J.; Volokita, M.; Novoplansky A. (1999): "Response of tomato plants to saline water as affected by carbon dioxide supplementation. I Growth, yield and fruit quality". *J. Hort. Sci. and Biotechnology*, (74)2. pp. 238-242.
- Li, Y. L. (2000). *Analysis of greenhouse tomato production in relation to salinity and shoot environment*. Thesis. University of Wageningen. The Netherlands. pp. 96.

- Lorenzo, P. (1996): *Intercepción de luz, Bioproductividad e Intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernal de Cucumis sativus L.* Almería; Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. D.G.I.A. Monografías 17/96. pp. 255.
- Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Medrano, E.; Escobar, I.; García, M. (1997): "Gestión del clima en la horticultura intensiva del sur mediterráneo"; *Horticultura*, (119). pp. 80-83.
- Lorenzo, P. (2001). "Enriquecimiento Carbónico"; *Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo*. Cajamar (ed.); pp. 25-34.
- Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Medrano, E.; García, M. L.; Caparrós, I.; Giménez, M. (2003): "EL sombreado móvil exterior: efecto sobre el clima del invernadero, la producción y la eficiencia en el uso del agua y la radiación". Fernández, M.; Lorenzo, P.; Cuadrado, I. (Eds.): *Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos*. Curso superior de especialización 7. DGIFA, FIAPA y Cajamar; pp. 207-229.
- Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Medrano, E.; Alonso, F. J.; García, M. L. (2010): "Sombreado"; Sánchez-Guerrero, M. C.; Alonso, F. J.; Lorenzo, P.; Medrano, E. (eds.): *Manejo del clima en el invernadero Mediterráneo*. IFAPA. pp. 39-54.
- Maas, E. V.; Hoffman G. J. (1977): "Crop Salt tolerance-Current assessment"; *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, (103) IR2. pp. 115-134.
- Maggio, A.; Dalton, F. N.; Piccinni, G. (2002): "The effects of elevated carbon dioxide on static and dynamic indices for tomato salt tolerance"; *Euro.J.Agron.* (16); pp. 197-20.
- Mulholland, B. J.; Edmondson, R. N.; Fussel, M.; Basham, J.; Ho, L. C. (2003): "Effects of high temperature on tomato summer fruit quality"; *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, (78) 3; pp. 365-374.

- Nederhoff, E. M. (1994): *Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops*. Tesis Doctoral. Aula van de Landbouwniversiteit te Wageningen, The Netherlands. p. 216.
- Sánchez-Guerrero, M. C. (1999): *Enriquecimiento carbónico en cultivos hortícolas bajo invernadero de polietileno*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. p. 266.
- Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Castilla, N.; Soriano, T.; Baille, A. (2005). "Effect of variable CO₂ enrichment on greenhouse production in mild winter climates"; *Agricultural and Forest Meteorology*, (132); pp. 244-252.
- Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Baille, A.; Castilla, N. (2009): "Effects of EC-based irrigation scheduling and CO₂ enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop". *Agricultural Water Management*, (96); pp. 429-436.
- Stanghelini, C.; Incrocci, L.; Gázquez, J. C.; Dimauro, B. (2008): "Carbon dioxide concentration in Mediterranean greenhouses: how much lost production?"; *Acta Horticulturae*, (801); pp. 1.541-1.549.
- Saltveit, M. E. (2005): "Fruit Ripening and Fruit Quality". Heuvelink. E. (ed.): *Tomatoes*. CABI Publishing. Cambridge. USA; pp. 145-170.
- Sato, S.; Peet, M. M.; Thomas, J. F. (2000): "Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. under chronic, mild heat stress"; *Plant, Cell and Environment*, (23); pp. 719-726.
- Verlodt, H. (1990): *Greenhouses in Cyprus, protected cultivation in the Mediterranean climate*. FAO, Rome.
- Warren Wilson, J.; Hand, D. W.; Hannah, M. A. (1992): "Light interception and photosynthesis efficiency in some glasshouse crops"; *Journal of Experimental Botany*, (43); pp. 363-373.
- Zabeltitz, C. (1992): "Current state of technology and introduction to innovation in greenhouse horticulture"; *Acta horticulture*, 312; pp. 19-28.

