



INNOVACIÓN EN ESTRUCTURAS PRODUCTIVAS  
Y MANEJO DE CULTIVOS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

Juan Carlos López  
Roberto García Torrente  
**[Coordinadores]**

- [07-22] INVERNADEROS, INNOVACIÓN PARA LA PRODUCTIVIDAD Y MEDIOAMBIENTE  
*R. García Torrente y J. C. Pérez Mesa [Cajamar y Universidad de Almería]*
- [23-44] EL CULTIVO EN INVERNADEROS Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA  
*Pilar Lorenzo [IFAPA]*
- [45-70] DESARROLLO DE ESTRUCTURAS PARA INVERNADERO  
*Juan I. Montero [IRTA]*
- [71-88] MATERIALES PARA CUBIERTA DE INVERNADEROS  
*Enrique Espí [Centro de tecnología Repsol]*
- [89-114] GREENHOUSE CLIMATE CONTROL IN MEDITERRANEAN GREENHOUSES  
*C. Kittas, N. Katsoulas, T. Bartzanas [University of Thessaly and Inst. of Technology and Management of Agricultural Ecosystems]*
- [115-138] USO DEL AGUA DE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE INVERNADERO  
*M. D. Fernández, R. B. Thompson, S. Bonachela, M. Gallardo, M. R. Granados [Fundación Cajamar y Universidad de Almería]*
- [139-160] CULTIVO PROTEGIDO DE ESPECIES FRUTALES  
*J. J. Hueso, F. Alonso, V. Pinillos, J. Cuevas [Fundación Cajamar y Universidad de Almería]*
- [161-180] ¿RESÍDUOS? PRODUCTOS CON OTRAS CALIDADES Y DISTINTAS APLICACIONES  
*A. Sevilla, M. A. Domene, M. Uceda, D. Buendía y J. L. Racero [Fundación Cajamar]*
- [181-210] ENERGÍAS RENOVABLES EN LOS INVERNADEROS  
*M. Pérez García y J. A. Sánchez Molina [Universidad de Almería]*
- [211-226] ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A HORTICULTURA PROTEGIDA  
*M. Asunción Antón Vallejo [IRTA]*







CEA

CUADERNOS  
DE ESTUDIOS  
AGROALIMENTARIOS

03

Julio 2012

ISSN 2173-7568

# INNOVACIÓN EN ESTRUCTURAS PRODUCTIVAS Y MANEJO DE CULTIVOS EN AGRICULTURA PROTEGIDA

JUAN CARLOS LÓPEZ  
ROBERTO GARCÍA TORRENTE  
*[Coordinadores]*



# CEA

CUADERNOS  
DE ESTUDIOS  
AGROALIMENTARIOS

## **CEA. Cuaderno de Estudios Agroalimentarios**

- © del texto: los autores.
- © de la edición: Fundación Cajamar.

**Edita:** Fundación Cajamar. Puerta de Purchena, 10. 3º planta - 04001 Almería

**Diseño y maquetación:** Beatriz Martínez Belmonte

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

**Fecha de publicación:** Julio 2012

---

La Fundación Cajamar no se responsabiliza de la información y opiniones contenidas en esta publicación, siendo responsabilidad exclusiva de sus autores.

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como la edición de su contenido por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, electrónico o mecánico, especialmente imprenta, fotocopia, microfilm, *offset* o mimeógrafo, sin la previa autorización escrita de los titulares del *Copyright*.



- [07-22]** INVERNADEROS, INNOVACIÓN PARA LA PRODUCTIVIDAD Y EL MEDIOAMBIENTE  
*R. García Torrente y J. C. Pérez Mesa (Cajamar y Universidad de Almería)*
- [23-44]** EL CULTIVO EN INVERNADERO Y SU RELACIÓN CON EL CLIMA  
*Pilar Lorenzo (IFAPA)*
- [45-70]** DESARROLLO DE ESTRUCTURAS PARA INVERNADERO  
*Juan I. Montero (IRTA)*
- [71-88]** MATERIALES PARA CUBIERTA DE INVERNADEROS  
*Enrique Espí (Centro de tecnología Repsol)*
- [89-114]** GREENHOUSE CLIMATE CONTROL IN MEDITERRANEAN GREENHOUSES  
*C. Kittas, N. Katsoulas, T. Bartzanas (University of Thessaly and Inst. of Technology and Management of Agricultural Ecosystems)*
- [115-138]** USO DEL AGUA DE RIEGO EN LOS CULTIVOS DE INVERNADERO  
*M. D. Fernández, R. B. Thompson, S. Bonachela, M. Gallardo, M. R. Granados (Fundación Cajamar y Universidad de Almería)*
- [139-160]** CULTIVO PROTEGIDO DE ESPECIES FRUTALES  
*J. J. Hueso, F. Alonso, V. Pinillos, J. Cuevas (Fundación Cajamar y Universidad de Almería)*
- [161-180]** ¿RESÍDUOS? PRODUCTOS CON OTRAS CALIDADES Y DISTINTAS APLICACIONES  
*A. Sevilla, M.A. Domene, M. Uceda, D. Buendía y J. L. Racero (Fundación Cajamar)*
- [181-210]** ENERGÍAS RENOVABLES EN LOS INVERNADEROS  
*M. Pérez García y J. A. Sánchez Molina (Universidad de Almería)*
- [211-226]** ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A LA HORTICULTURA PROTEGIDA  
*M. Asunción Antón Vallejo (IRTA)*







## INVERNADEROS, INNOVACIÓN PARA LA PRODUCTIVIDAD Y EL MEDIOAMBIENTE

*Roberto García Torrente y Juan Carlos Pérez Mesa  
(Cajamar y Universidad de Almería)*

### RESUMEN

La sostenibilidad de la actividad hortícola bajo invernadero pasa por el aumento de la productividad. Esta variable implica la gestión de todas las partidas que conforman la cuenta de resultados, tanto desde el punto de vista del gasto como del ingreso. El aumento de la productividad viene determinado por la innovación en estructuras, manejo del invernadero y gestión medioambiental, estando todos estos puntos interrelacionados. Esta definición implica que toda innovación debe generar un beneficio extra, por lo que al criterio técnico siempre debe seguir un análisis coste-beneficio. Adicionalmente, este trabajo detecta que la gestión medioambiental no se contempla aún como un factor limitante para el mantenimiento de la actividad.

### SUMMARY

*Sustainability of greenhouse horticultural sector depends of increasing productivity. This variable involves the management of all parties in the income statement. The Increasing productivity is determined by innovation in structures, greenhouse management and environmental care, all these points are interrelated. This definition implies that all innovation must generate an extra benefit, so the technical criteria should be followed by a cost-benefit analysis. Additionally, this study finds that environmental management is not considered even as a limiting factor for the maintenance of the activity.*



## 1. Introducción

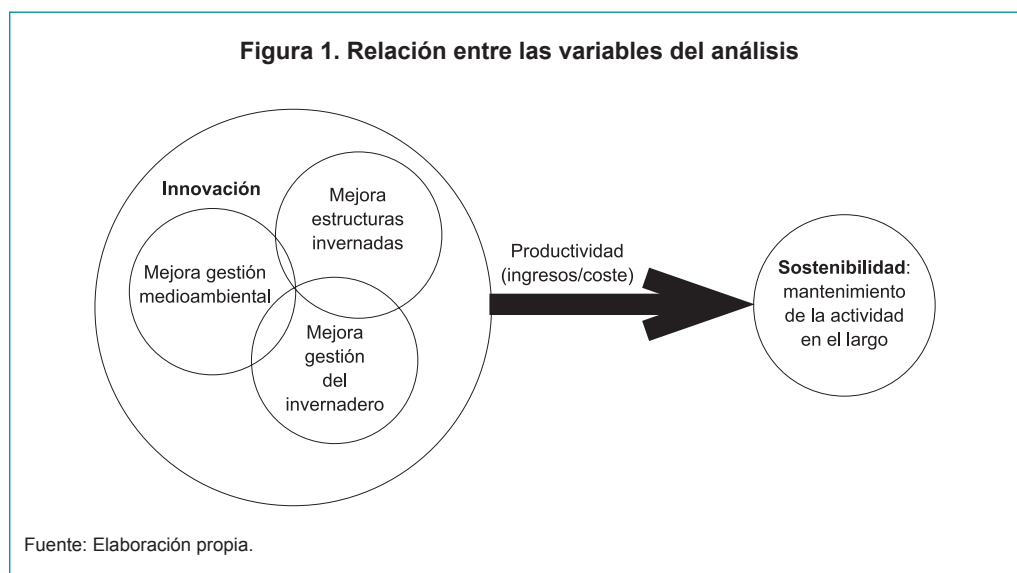
El sureste de España ha sufrido en los últimos cincuenta años un gran cambio en la estructuración del territorio, el crecimiento de la renta y el reparto espacial de la población. Esta variación ha estado determinada, en un porcentaje alto, por la actividad agrícola que se ha desarrollado en la zona. En la actualidad existen diversos aspectos que restringen esta actividad y que podemos resumir en dos grandes grupos: límites económicos, relacionados con los *input* productivos y la rentabilidad; y límites territoriales dependientes de la ordenación y la gestión medioambiental. Todos estos aspectos están ligados a la existencia de una actividad madura que necesita repensarse para asegurar su futuro. En este marco, es imprescindible analizar tres variables que configuran la base de un sistema sostenible y que ayudarán a obviar las limitaciones del modelo: innovación, mejora medioambiental y productividad. Estas tres palabras son utilizadas de forma común entre los actores económicos dentro del sector agrario por lo que es conveniente definir la relación entre ellas.

La definición de innovación es variada pero básicamente consiste en la introducción de nuevos procesos productivos, productos y mercados, o una mejora organizacional que redunde en un mayor beneficio (Bruce y Meulenberg, 2002). Un empresario innovador será aquel que utilice la tecnología, o su propio ingenio, como herramienta fundamental y se preocupe de establecer un funcionamiento de su negocio que permita absorber y aplicar el conocimiento que se genera en su entorno (Pérez-Mesa y Fernández, 2005). Toda actividad innovadora tiene dos consecuencias: 1) la disminución de los costes, gracias al empleo de materiales, maquinaria o procesos nuevos; o 2) el incremento del precio de los bienes producidos por la empresa, gracias a su novedad, calidad o reconocimiento. Toda innovación que provoque un aumento de la brecha entre ingresos y costes genera un beneficio mayor por unidad de coste, es decir, un aumento de la eficiencia. Desde este punto de vista, un análisis de los márgenes de una empresa supone un estudio de productividad en sentido amplio.

Por otro lado, el hecho de decidir la introducción de algún sistema de control medioambiental implica una innovación relacionada con la calidad que tendrá efecto sobre la productividad. El respeto medioambiental es pues una innovación que aunque a veces no tenga una repercusión directa sobre el coste puede aumentar el margen vía incremento de ingresos. La relación medioambiente y rentabilidad ha sido detectada por diversos trabajos en el sector hortofrutícola (Céspedes y Galdeano, 2004; Galdeano, 2003).

Es importante remarcar que no podemos denominar innovación a cualquier tipo de cambio; éste debe suponer mayores ganancias. La aplicación práctica de este principio a la producción intensiva implica la necesidad de estudiar la viabilidad económica de cualquier inversión o mejora productiva. Labor prioritaria a la que deberían dedicarse centros públicos y privados de investigación relacionados con la agricultura.

El marco de análisis de este documento queda reflejado en la Figura 1. Primero se describe la evolución de los invernaderos en el mundo y España. Este trabajo se centrará en la provincia de Almería. Posteriormente se describe cómo diversas innovaciones (la inversión en nuevas estructuras, la gestión del invernadero y las mejoras medioambientales) redundan en mayor productividad, entendiendo ésta como la relación entre ingresos y costes. Destaca la interacción múltiple entre todas las innovaciones contempladas. Por último, se realiza un autodiagnóstico del estado de todas las variables con el objetivo de buscar la sostenibilidad de la actividad en el largo plazo.





## 2. Invernaderos: un sistema productivo en expansión

En los últimos años la horticultura en invernadero ha aumentado de forma constante en casi todo el planeta. Se estima que la superficie invernada (con plástico) en el mundo ronda las 750.000 has. China, Japón, Corea y otras zonas de extremo oriente suman el 80 % del total mientras que los países de la cuenca mediterránea (España, Italia, Turquía, Marruecos, Francia, Argelia, Israel o Grecia) apenas suponen un 15 % (Jouet, 2004). Sólo China posee más de 250.000 ha, que se han conseguido a base de crecimientos del 30 % anual (Espí *et al.*, 2006). En toda la cuenca mediterránea destaca el crecimiento de Turquía a razón anual de un 4 % (Emekli *et al.*, 2010). En general, los datos reflejan una situación de aumento de la competencia donde las estructuras productivas, aunque con sus peculiaridades locales, tienden a una convergencia favorecida por la transferencia tecnológica realizada desde otras zonas de producción.

El caso español es una excepción, a las dificultades territoriales de expansión, sobre todo en Almería, debemos sumar la existencia de un mercado maduro donde mantener la rentabilidad de las fincas se hace difícil. Este punto es común denominador en las principales zonas productoras (Almería, Canarias y Murcia), manifestándose en una reducción de la superficie hortícola invernada (Tabla 1). La consecuencia inmediata de esta situación es el aumento del tamaño por explotación como método de optimización de recursos (Figura 2).

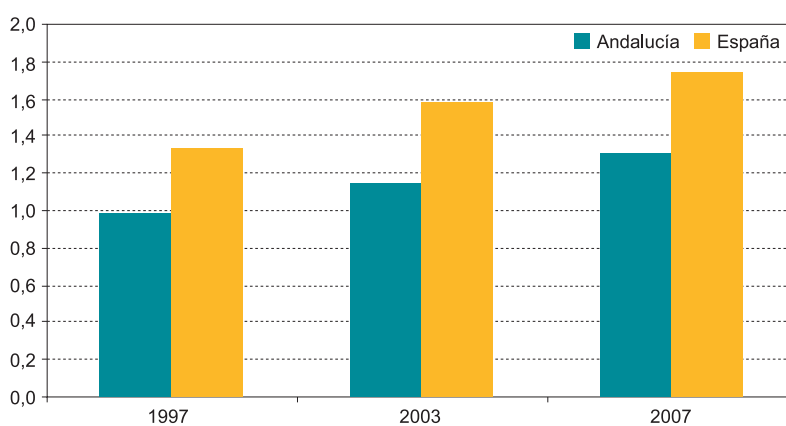
Esta tendencia también se aprecia en Holanda donde cada productor de hortalizas cuenta con una superficie media de 1,8 hectáreas, cifra que se ha ido incrementando en los últimos años ante la estabilización de la rentabilidad. En contraposición a España, en Holanda la superficie total invernada (en cristal) ha crecido en las últimas campañas, sobre todo como consecuencia del incremento del cultivo de pimiento y tomate, y las mejoras técnicas, como la implementación de la cogeneración que ha reducido notablemente los gastos en calefacción, que están propiciando un aumento de la producción fuera del ciclo estival.

**Tabla 1. Superficie invernada destinada a hortalizas según comunidad autónoma**

Comunidad	1997	2003	2007	Var. 1997/03 (%)	Var. 2004/07 (%)
Otras	200	516	438	158,0	-15,0
Galicia	146	240	131	64,0	-45,0
País Vasco	110	181	169	65,0	-7,0
Navarra	153	181	146	18,0	-19,0
Aragón	145	49	34	-66,0	-31,0
Cataluña	251	185	357	-26,0	93,0
Castilla y León	313	112	164	-64,0	46,0
C. Valenciana	790	859	794	9,0	-8,0
R. de Murcia	3.226	6.023	5.949	87,0	-1,0
Canarias	3.206	3.829	3.258	19,0	-15,0
Andalucía	24.763	32.623	33.774	32,0	4,0
Almería	24.050	26.644	25.387	11,0	-5,0
<b>Total</b>	<b>33.303</b>	<b>44.798</b>	<b>44.776</b>	<b>35,0</b>	<b>0,0</b>

Fuente: Datos MAGRAMA y Céspedes *et al.* (2009).

**Figura 2. Evolución de la superficie por explotación invernada. En hectáreas**



Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente (MAGRAMA).



### 3. Productividad y rentabilidad en el invernadero

Según la situación descrita, debemos preguntarnos cuál es el estado del productor hortícola en invernadero. Para realizar este análisis debemos manejar tres variables: productividad en la finca ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), precios y costes unitarios. Todas ellas son indicadores del grado de innovación existente en el sector. Trabajar sobre estas dimensiones es complejo ya que el grado de variabilidad entre fincas es muy alto, a esto debemos unir que la variable precio recoge efectos de mercado independientes de la calidad. En el cálculo que se realiza en este artículo se incluyen los costes corrientes del cultivo (mano de obra, plásticos, semillas, agua, agroquímicos, energía, intereses y otros servicios) y los costes de amortización, todos ellos para una finca tipo en la provincia de Almería (Fundación Cajamar). Los datos de precios y productividades medios se ponderan según la importancia de cada cultivo<sup>1</sup>.

La Tabla 2, no debe ser analizada desde el punto de vista de los valores absolutos sino como una comparación anual de las variables sobre las que se fundamenta la rentabilidad del agricultor. Lo primero que destaca es que los precios no han aumentado, sino que, utilizando medias (2002-2006 y 2007-2010), se han reducido en un 5,5 %. Los costes unitarios (por kg) se han mantenido estables gracias a los crecimientos de las productividades ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) en campo: un 8 %. Cabe destacar que la campaña 2009/10 se ha visto afectada por existencia de *Tuta Absoluta*, de hecho, los técnicos de Coexphal estimaron que en los invernaderos almerienses se había perdido entre 1 y 1,5  $\text{kg}/\text{m}^2$  de tomate.

Por otro lado, el margen variable del agricultor disminuye un 26 %. El margen total (beneficio) cae un 36 %, y no lo ha hecho en mayor medida porque ha podido repartir sus costes entre un mayor número de kilos por hectárea. De hecho los costes corrientes totales crecen un 10 % y los totales un 5 %. Se aprecia que el mantenimiento de los beneficios pasa por el aumento de la productividad en finca. El punto conflictivo es que ésta se fundamenta en inversiones de mejora de las estructuras productivas. El problema se reduce a la necesidad de financiar con los beneficios actuales, las inversiones que los invernaderos necesitan. El invernadero estándar en Almería es el parral multicapilla simétrico (60 %) y la antigüedad media está entre 5-10 años (Céspedes *et al.*, 2009). Existe por tanto una renovación aceptable en el campo que, sin embargo, no está consiguiendo aumentos de productividad relevantes.

<sup>1</sup> Tomate, pimiento, pepino, calabacín, berenjena, judía, melón y sandía. Se parte de una productividad media de 11  $\text{kg}/\text{m}^2$  que varía en función de los cambios de productividad calculados según datos de la Consejería de Agricultura.

A pesar de lo comentado, debemos ser cautelosos a la hora de invertir porque pueden existir innovaciones poco rentables. A modo de ejemplo, si un agricultor quisiera renovar su estructura con un invernadero tipo multitúnel bien equipado, que supondría multiplicar por 4 el valor de la inversión respecto a un invernadero tipo, según el esquema de cálculo propuesto tendría que multiplicar por 1,7 la productividad en campo (considerando que sus costes corrientes no aumentasen).

Desde otro punto de vista, un aumento del margen total también podría ser consecuencia de la introducción de manejos más eficientes del cultivo que pudieran reducir los costes corrientes. Por ejemplo, suponiendo que una innovación como la utilización de lucha integrada redujese un 50 % el coste del control de plagas, el gasto corriente se reduciría un 4 %. Para el modelo de costes propuesto (Tabla 2) esto supondría que para la campaña 2009/2010 el agricultor obtendría un céntimo más por kilogramo, sin contar la incidencia en la calidad del producto que repercutiría en el margen vía aumento del precio.

En general, el panorama actual está marcado por una situación de rentabilidad ajustada. El agricultor debe ser cuidadoso con la gestión que haga de sus recursos. Se ha demostrado que incluso pequeñas innovaciones en el manejo del invernadero tienen repercusiones importantes en la cuenta de resultados. Por supuesto, las inversiones más relevantes deben ser estudiadas en el marco de un análisis coste-beneficio.

**Tabla 2. Evolución del coste total (€) y unitario (€/kg) en una finca tipo (1 ha) de Almería**

Producto	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	Media 2002-06	Media 2007-10	% Var. Medias
<b>Costes corrientes (€)</b>	38.082	38.811	39.831	41.332	42.638	44.620	44.575	42.162	39.514	43.499	10
<b>Amortización (€)</b>	11.953	12.395	12.983	13.452	13.406	13.428	13.362	13.255	12.696	13.363	5
<b>Costes totales (€)</b>	50.035	51.206	52.814	54.784	56.044	58.048	57.937	55.417	52.210	56.862	9
<b>Productividad finca (kg/m<sup>2</sup>)</b>	11,0	10,4	9,5	10,1	10,6	12,0	11,6	10,5	10,3	11,1	8
<b>Costes corrientes (€/kg)</b>	0,35	0,37	0,42	0,41	0,40	0,37	0,39	0,40	0,38	0,39	1
<b>Costes totales (€/kg)</b>	0,45	0,49	0,55	0,54	0,53	0,48	0,50	0,53	0,51	0,51	0
<b>Ingresos (€/kg)</b>	0,60	0,60	0,60	0,56	0,60	0,53	0,54	0,56	0,59	0,56	-6
<b>Margen corriente (€/kg)</b>	0,25	0,23	0,27	0,15	0,20	0,16	0,15	0,15	0,22	0,17	-26
<b>Margen total (€/kg)</b>	0,14	0,11	0,13	0,02	0,07	0,05	0,04	0,03	0,10	0,05	-54

Fuente: Fundación Cajamar y Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía. Elaboración propia.



## 4. Hacia una productividad medioambiental

Tal y como hemos comentado, la innovación medioambiental es un factor que incide en la productividad mediante su impacto en la calidad real o percibida, y por ende, en el precio. En este sentido no podemos obviar el proceso de cambio que se está produciendo en la opinión pública en cuanto al carácter contaminante que se le atribuye a la agricultura intensiva. El desarrollo tecnológico aplicado a los cultivos ha perjudicado la visión que la población de toda Europa tiene de este tipo de agricultura, viéndola, en la actualidad, como un actor fundamental en el proceso de degradación medioambiental. De hecho, según un estudio realizado por GFK, y encargado por la Interprofesional de Frutas y Hortalizas de Andalucía (Hortyfruta), 4 de cada 10 alemanes consideraban que la imagen de España como productor era negativa (Pardo, 2010). Desde las administraciones públicas se está promoviendo un cambio de rumbo que sustituya el concepto de productividad (en sentido estricto) por el de “sostenibilidad” entendida como la introducción de prácticas menos intensivas y más respetuosas con el medio ambiente. Las definiciones de agricultura sostenible abarcan diferentes aspectos, como por ejemplo el mantenimiento de la actividad en el largo plazo, pero, sin duda, uno de los que sobresale es la conservación y el re-establecimiento del medio ambiente.

Uno de los problemas fundamentales es que el productor todavía no identifica medioambiente y rentabilidad. Esto es así porque existe otra asociación previa entre medioambiente y certificaciones de calidad, las cuales se han convertido en estándares dentro del mercado (entre otras, Global Gap, o la UNE 150.000) y, por tanto, están dejando de ser fuente de ventaja competitiva. En consecuencia, es conveniente tener una visión amplia de lo que implica el respecto al entorno y de los impactos que el sector invernadero genera, de esta manera seremos capaces de anticiparlos y mitigarlos. Gómez-Orea (2003) detectó como problemas más acuciantes: la sobreexplotación y contaminación de los acuíferos, las extracciones de áreas y suelos, las deposiciones de residuos agrícolas, la ocupación de zonas de interés ambiental, la deficiencia de la red viaria, las ocupaciones de ramblas y zonas inundables, y la insuficiente planificación, gestión y vigilancia. Desde Coexphal (2002) también se profundizó en estas cuestiones, encontrando como impacto más relevantes la alteración del paisaje, entendida como la pérdida de calidad paisajística como consecuencia de la aglomeración de residuos. A resultados similares llegan Tolón y Lastra (2010), reconociendo la necesidad de potenciar los instrumentos preventivos de gestión ambiental, es decir, la planificación,

el diseño y la evaluación de impacto ambiental. Muchos de los aspectos comentados siguen vigentes, otros han reducido su impacto como consecuencia de la caída en el ritmo de creación de nuevas fincas.

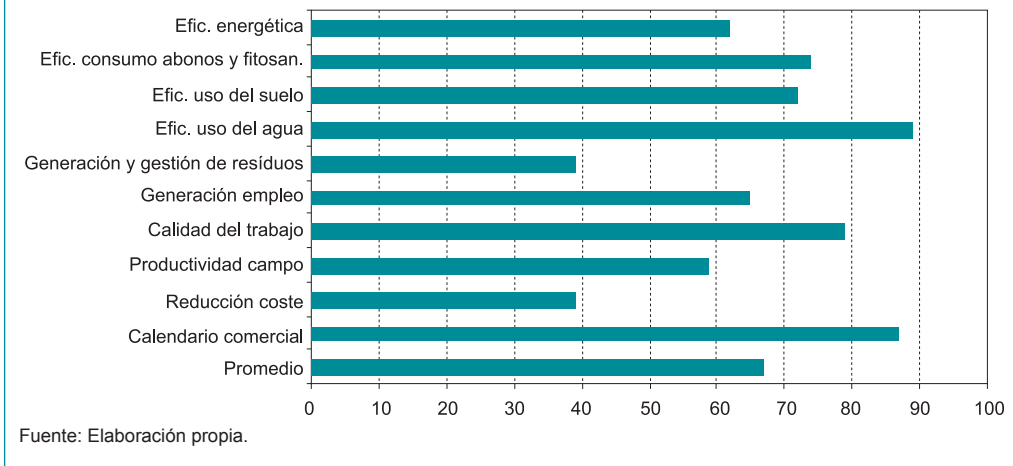
No todos los impactos son negativos. Campra *et al.* (2008) reconocen la existencia de un efecto albedo debido a la concentración elevada de invernaderos que provocan una reflexión alta de la luz. La horticultura intensiva estaría amortiguando el calentamiento local de la temperatura asociado al incremento global de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, el invernadero como actividad económica ha compensado el problema de abandono y marginación de tierra agrarias (Galdeano *et al.*, 2010). De hecho, la propia Unión Europea reconoce que se debe intensificar la actividad en tierras ya convertidas a la agricultura y que ofrecen altas posibilidades de productividad, dado que es preferible este criterio a la conversión de estas zonas en tierras marginales frágiles. Es decir, la intensificación del cultivo evita un impacto ambiental mayor que el generado por una agricultura extensiva de baja productividad.

## 5. Un autodiagnóstico de sostenibilidad

Desde un punto de vista amplio, se realiza a continuación un análisis de la sostenibilidad general de un invernadero estándar. Este estudio tiene en cuenta la valoración de diversos *ítems* que influyen en la probabilidad del mantenimiento sostenible de la actividad en el largo plazo (Caballero, 2006) y que podemos agrupar en 3 tipos: 1) indicadores ambientales (eficiencia energética, vertidos, consumo de químicos, agua y utilización del suelo); 2) indicadores sociales (generación de empleo y calidad del trabajo); 3) indicadores económicos (productividad en campo, reducción de costes, y calendario comercial). Para valorar el estado de todas estas variables se recurrió a la realización de una encuesta entre actores del sector<sup>2</sup> (principalmente técnicos de campo y presidentes de cooperativas). Los resultados se pueden ver en la Figura 3. El valor cero equivale a una consecución nula del objetivo. El óptimo equivale a un valor del 100 %. Debe tenerse en cuenta que muchas variables llevan implícitas la consideración de otros factores indirectos. Por ejemplo, la existencia de un calendario comercial óptimo dependerá de una correcta programación del cultivo; o la calidad del trabajo dependerá del tipo de mano de obra disponible (local, inmigrante,...). En general, este análisis pretende servir de aproximación a un autodiagnóstico de la situación actual del campo.

<sup>2</sup> Se han realizado un total de 15 encuestas, intentando seleccionar a personas con peso específico en el sector.

**Figura 3. Sostenibilidad del sistema de producción hortícola en invernadero. En porcentaje**



Los datos muestran un sector que se considera así mismo sostenible (la media simple casi alcanza el 70 %), pero con puntos débiles importantes: la capacidad de reducir el coste en finca, la generación y tratamiento de los residuos, o la falta de productividad en campo. Sería interesante repetir este ejercicio con clientes ya que permitiría conocer el grado de asimetría existente entre la percepción de origen y destino.

También es relevante conocer la ponderación de cada uno de los ítems seleccionados. Para ello se ha aplicado otra encuesta, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process* o AHP) desarrollado por Saaty (1977, 2001), con el objetivo de conocer la importancia relativa que los encuestados atribuyen a distintas variables (atributos). Siguiendo a Saaty (1980), la ponderación de los atributos ( $w_j$ ) se obtiene sobre la base de comparaciones por pares. Saaty propone una escala entre 1 y 9 (el 1 equivale a una importancia similar entre ambos atributos, mientras que el 9 representa una importancia absoluta del primer atributo respecto al segundo).

Para el cálculo de los pesos particulares que cada encuestado asigna a los diferentes atributos se ha optado por la media geométrica ya que la literatura (Fichtner, 1986) no encuentra evidencia alguna sobre la superioridad absoluta del empleo de otros sistemas (p.e. regresiones o programación por metas). La expresión matemática utilizada será:

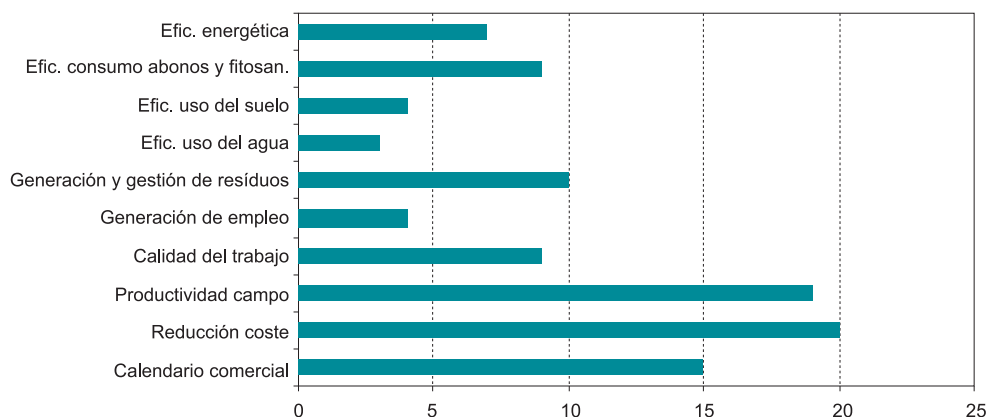
$$w_{jk} = \left[ \prod_{i=1}^n A_{ijk} \right]^{1/n}; j=1 \dots n$$



Siendo “n” el número de atributos, en nuestro caso 10, y “k” el número de encuestados. Como punto final debe resumirse toda la información suministrada por cada uno de los encuestados. Aunque la técnica AHP fue diseñada para decisiones individuales, posteriormente se generalizó para la decisión de grupos (Easley *et al.*, 2000). Tal y como proponen Forman y Peniwati (1998) se utiliza, de nuevo, la media geométrica para la integración de los encuestados.

Los resultados de la ponderación de las variables pueden verse en la Figura 4. El control de costes, la definición de un calendario comercial adecuado y la productividad en campo son los factores más importantes, según los encuestados, de cara a la sostenibilidad del sistema. Los variables puramente ambientales y sociales siguen estando muy por debajo de las económicas. El cálculo de una nueva media ponderada de sostenibilidad nos da un valor de 62 %, respecto a la media simple del 67 % reflejada en la Figura 3.

**Figura 4. Ponderaciones que los encuestados dan a cada variable. Calculado por el método AHP de Saaty**



Fuente: Elaboración propia.

## 6. Conclusiones

El mantenimiento a largo plazo de la actividad hortícola bajo invernadero pasa por el aumento de la productividad entendida en sentido amplio. Esta variable implica la gestión de todas las partidas que conforman la cuenta de resultados, tanto desde el punto de vista del gasto como del ingreso. El aumento de la productividad viene determinado por la implantación de cambios (innovación), tanto estructurales como de manejo del invernadero, que generen un rendimiento extra. Esto implica que al criterio técnico siempre debe seguir un análisis coste/beneficio.

Los datos muestran que el beneficio del agricultor de invernadero se ha visto reducido en los últimos años. La caída del margen se ha amortiguado gracias a un incremento de las productividades en campo ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). Sin embargo, siguen existiendo cambios anuales importantes en las cantidades recolectadas como consecuencia de deficiencias en las estructuras invernadas. El escaso beneficio dificulta la inversión, lo que ha llevado a muchos agricultores a vender sus fincas por falta de rentabilidad. Este hecho queda reflejado en el estancamiento de la superficie y el incremento del tamaño medio por explotación. Las fincas de mayor tamaño están intentando aumentar sus márgenes mediante un uso más eficiente de los recursos que reduzca sus costes unitarios. En este trabajo se ha visto que innovaciones en el manejo del invernadero pueden tener repercusiones relevantes en el beneficio.

Por otro lado, la gestión medioambiental debe ser considerada un factor de productividad que afecta a la calidad percibida y, por ende, al precio. Hasta la fecha las acciones encaminadas a mejorar este factor se han basado en la implantación de diferentes normas de calidad, adoleciendo de instrumentos preventivos de gestión ambiental, es decir, de planificación, diseño y evaluación del impacto ambiental.

Finalmente, la realización de una autoevaluación de la sostenibilidad del invernadero hortícola demuestra que: 1) existen puntos débiles cuya solución podría mejorar sensiblemente la viabilidad del sistema; y 2) el margen de crecimiento es amplio, por lo que con las estrategias correctas, algunas de ellas analizadas en este trabajo, el sector puede asegurar su futuro. Adicionalmente, la importancia de las variables económicas, siguen pesando mucho más que las sociales o puramente ambientales. Hasta que el agricultor no reconozca la importancia de éstas últimas no tendrá una visión amplia de lo que lo implica la sostenibilidad y, por tanto, se dificultará la toma de decisiones acertadas.

## Referencias bibliográficas

- Bruce, W. y Meulenbergh, M. (2002): "Innovation in the Food Industry"; *agribusiness*, 18(1); pp. 1-21.
- Caballero, P. (2006): "La necesidad de cuantificar la sostenibilidad de los invernaderos"; *Vida Rural*, 15 noviembre; pp. 49-54.
- Campra, P.; Garcia, M.; Canton, Y.; Palacios-Orueta, A. (2008): "Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain"; *Journal of Geophysical Research*, (113); pp. 1-10.
- Céspedes Lorente, J.; Galdeano-Gómez, E. (2004): "Environmental practices and the value added of horticultural firms"; *Business Strategy and the Environment*, 13(6); pp. 403-414.
- Céspedes, A. J.; García, M. C.; Pérez, J. J.; Cuadrado, I. A. (2009): *Caracterización de la explotación hortícola protegida de Almería*. Ed. FIAPA; Fundación Cajamar. Almería.
- Coexphal (2002): "Estudio de impacto ambiental de la agricultura intensiva"; *Documento de trabajo*. Coexphal, Almería.
- Easley, R., Valacich, J. y Venkataramanan, M. (2000): "Capturing group preferences in a multicriteria decisión"; *European Journal of Operational Research*, (125); pp. 73-83.
- Emekli, N.; Kendirli, B.; Kurunc, A. (2010): "Structural analysis and functional characteristics of greenhouses in the Mediterranean region of Turkey"; *African Journal of Biotechnology*, 9(21); pp. 3131-3139.
- Espí, E.; Salmerón, A. Fontecha, A; García, Y.; Real, A. I. (2006): "Plastic films for agricultural applications"; *Journal of Plastic Film and Sheeting*, (22); pp. 85-101.



- Fichtner, J. (1986): "On deriving priority vectors from matrices of pairwise comparisons"; *Socio-Economic Planning Science*, (20); pp. 341-345.
- Forman, E. y Peniwati, K. (1998): "Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process"; *European Journal of Operational Research*, (108); pp 165-169.
- Fundación Cajamar (varios años): *Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería*. Fundación Cajamar. Almería.
- Galdeano-Gómez, E. (2003): "Competitividad de las cooperativas hortofrutícolas: análisis del impacto económico de las acciones de calidad y medioambientales en las OPFH andaluzas"; *Ciriec España, Revista de Economía Pública Social y Cooperativa*, (51); pp.43-83.
- Galdeano, E. Aznar, J. A.; Pérez-Mesa, J. C. (2010): "Intensive Horticulture in Almeria (Spain): A Counterpoint to current European Rural Policy Strategies"; *Journal of Agrarian Change*, 11(2); pp. 241-261.
- Gómez-Orea, D. (2003): *La horticultura de Almería: bases para un plan de ordenación territorial y Gestión medioambiental*. Ed. Instituto Cajamar. Almería.
- Jouet, J. P. (2004): *The Situation of Plasticulture in the World, Plasticulture*, (123); pp 48-57.
- MAGRAMA (2000, 2004, 2010): *Anuario de Estadística*. Secretaría General Técnica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente, Madrid.
- Pardo, M. J. (2010): "Significado de implantación del control biológico para la comercialización de la producción"; *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios*, (1); pp. 103-110.
- Pérez-Mesa, J. C.; Fernández Sierra, L. M. (2005): "Innovación y trazabilidad en los productos hortofrutícolas"; *IV Congreso internacional de Horticultura Mediterránea*. Ed. Universidad de Almería: 19-38.

- Saaty, T. (1977): "A scaling method for priorities in hierarchical structures"; *Journal of Mathematical Psychology*, (15); pp. 234-281.
- Saaty, T. (1980): *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw, Nueva York.
- Saaty, T. (2001): "The seven pillars of the Analytic Hierarchy Process"; köksalan, M. y Zionts, S. (eds.) *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium*, Heidelberg, Berlin.
- Tolón, A.; Lastra, X. (2010): "La agricultura intensiva del poniente almeriense: diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental"; *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, (8); pp. 18-40.





## 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 CO<sub>2</sub>, 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. m<sup>2</sup> y en verano habitualmente se incrementa la densidad de tallos hasta 3,75 tallos. m<sup>2</sup> (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<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 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

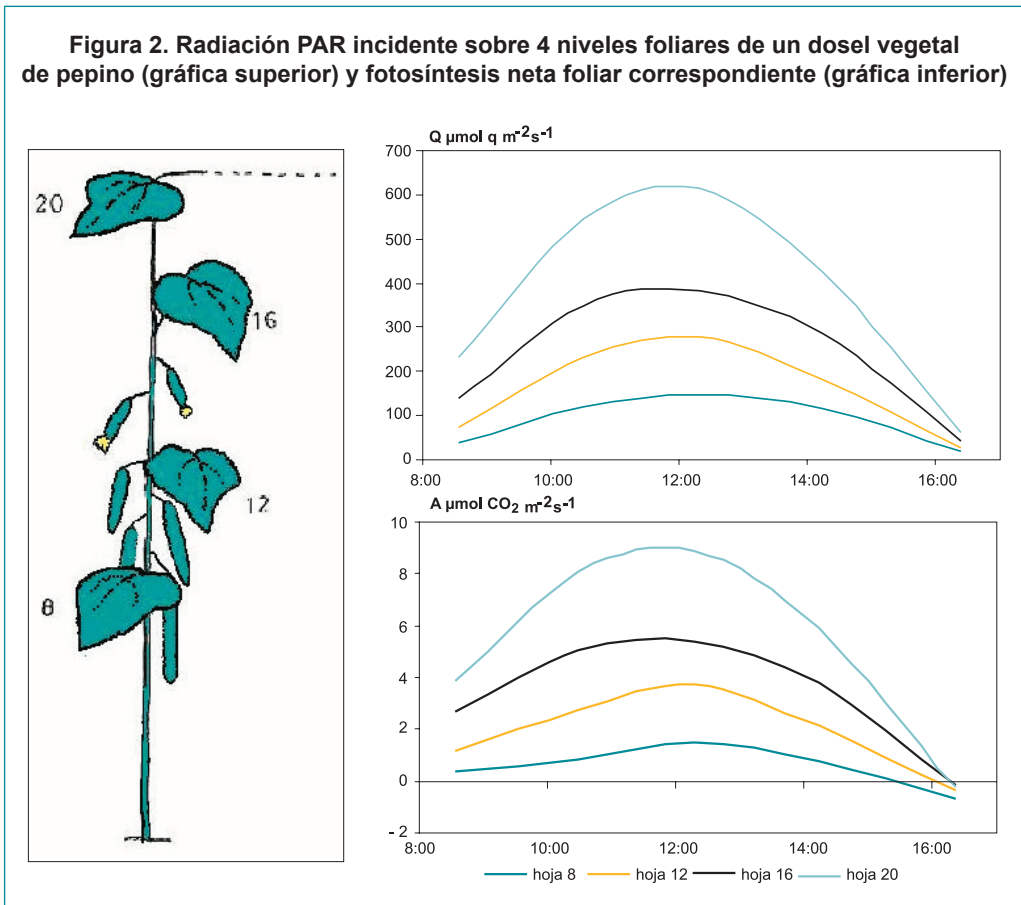
**Figura 1. Evolución del Índice de Área Foliar. Cultivo de pimiento**





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  $\text{mmol q m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 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  $\text{CO}_2$  y la tasa de respiración de las hojas de la parte alta era aproximadamente 10 veces superior a aquellas situadas en la parte inferior.

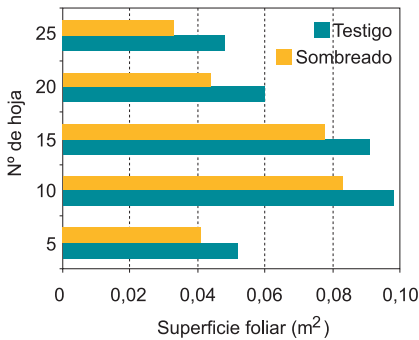
La arquitectura del dosel vegetal y el coeficiente de extinción de la radiación ( $k$ ) intervienen sobre la eficiencia de la intercepción de la radiación. El dosel vegetal de pepino y tomate tienen coeficientes de extinción alrededor de 0,7-0,8 y 0,5-0,7 respectivamente, lo que significa que las hojas 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.

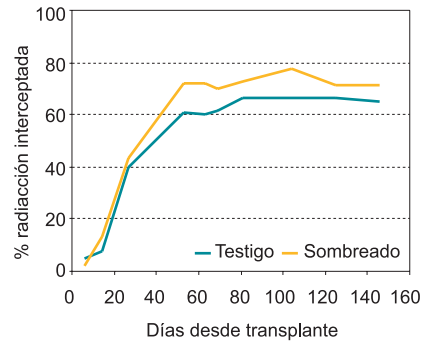
**Figura 3. Comparación de la morfología y la disposición foliar del dosel vegetal de tomate y pepino. Influencia sobre el coeficiente de extinción de la radiación**



**Figura 4a. Comparación de la superficie foliar de las hojas de diferente nivel de inserción de un cultivo de tomate con y sin sombreado. (García, 2007)**



**Figura 4b. Comparación del porcentaje de radiación interceptada por un cultivo de pepino con y sin sombreado**



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.

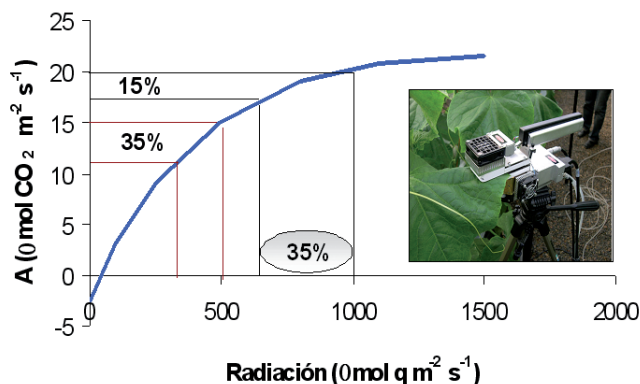
La ventilación natural es un sistema de refrigeración fundamental en el invernadero mediterráneo, sin embargo, actualmente las estructuras están dotadas de sistemas de ventilación poco eficientes (Baeza *et al.*, 2010) y prácticamente la mayoría de los productores recurren a sombrear la cubierta mediante 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  $\text{CO}_2$



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.

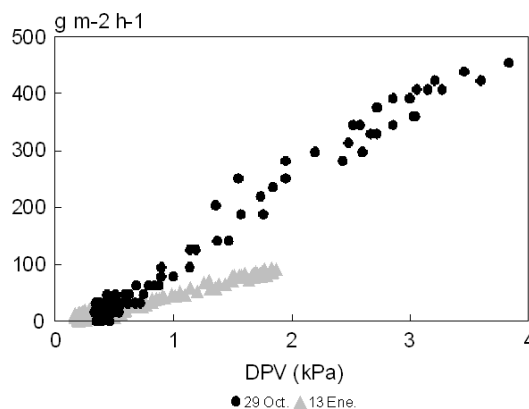
Cuando el DPV es alto, la elevada transpiración por área foliar o el efecto directo del DPV pueden reducir la conductancia estomática y la fotosíntesis neta. Esta respuesta representa un comportamiento conservador propio de numerosas especies con el fin de evitar la deshidratación irreversible de la 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<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> es una de las principales fuentes de la fotosíntesis. En la atmósfera actual, la concentración de CO<sub>2</sub> está en torno a 385 μmol mol<sup>-1</sup>, mientras que la concentración óptima para la fotosíntesis se sitúa entre 900-1000 μmol mol<sup>-1</sup>, lo que significa que la tasa de asimilación de carbono potencial está muy limitada por la actual concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico.

El invernadero es un recinto semicerrado en el que la actividad fotosintética de las plantas da lugar a un régimen fluctuante de CO<sub>2</sub>. Estudios llevados a cabo en los invernaderos mediterráneos han cuantificado que durante el 60 % del periodo de iluminación, la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, es inferior a la exterior. Se han registrado reducciones de la concentración de CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> dentro del invernadero.

Cuando se analiza la respuesta de la fotosíntesis neta a la variación de la concentración de CO<sub>2</sub>, 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<sub>2</sub> origina un cambio muy notable sobre la asimilación neta.

Una primera medida para paliar el agotamiento de CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> más habitual, analizada por clases de frecuencia, es de 250 a 300 μmol mol<sup>-1</sup> durante el periodo de iluminación (Sánchez-Guerrero *et al.*, 2005).

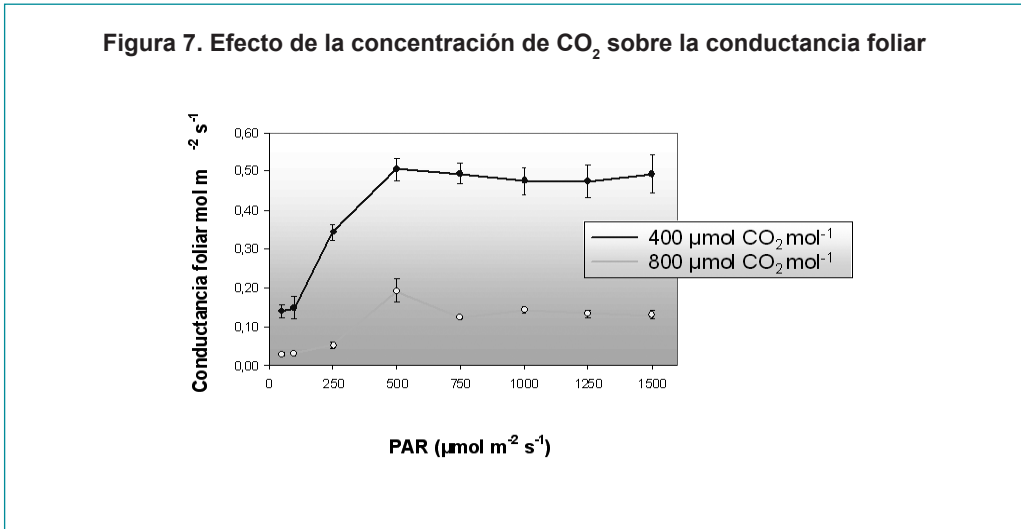
Estas circunstancias han puesto en evidencia el interés de valorar la aplicación de enriquecimiento carbónico teniendo en cuenta las características de los sistemas productivos del área mediterránea en los que la ventilación natural funciona durante la mayor parte del periodo productivo. Las experiencias 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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$ , (Lorenzo, 2001).

A nivel foliar el aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  es ligeramente inferior (3-5 %) respecto a los cultivos de





referencia. La aplicación de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>-1</sup> al aumentar la [CO<sub>2</sub>] a 1.200 μmol mol<sup>-1</sup> sin afectar a la calidad (Li *et al.*, 1999).

El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> 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<sup>-2</sup>, 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 invernadero 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 CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops*. Tesis Doctoral. Aula van de Landbouwwuniversiteit 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.



## DESARROLLO DE ESTRUCTURAS PARA INVERNADEROS

*Juan I. Montero  
(IRTA)*

### RESUMEN

Este artículo presenta un “estado del arte” referido a las estructuras de invernadero. Se analizan las repercusiones que sobre la luminosidad, la ventilación y otras variables internas del cultivo tienen los diversos diseños de invernadero. Asimismo, se discute cuáles son los más convenientes para las condiciones ambientales del área mediterránea.

### SUMMARY

*This article presents a "state of the art" referred to the greenhouse structures. We analyze the impact of various greenhouse designs on the light, ventilation and other internal variables of the crop. We also discuss which are most suitable for environmental conditions in the Mediterranean area.*

## 1. Introducción

La horticultura mediterránea está ubicada en una zona de inviernos suaves con abundancia de iluminación natural; el clima favorable ha permitido el desarrollo de invernaderos relativamente económicos, adaptados a las condiciones locales y con pocos sistemas de climatización aparte de la ventilación natural. Las condiciones de cultivo en dichas estructuras están con frecuencia alejadas del óptimo, pero aunque las producciones sean inferiores a las de los invernaderos muy tecnificados de zonas más frías, el modelo de invernadero sencillo es el más extendido en el Mediterráneo por su mayor rentabilidad (Castilla, 2005).

Este capítulo repasa brevemente las características de distintos tipos de invernaderos y hace hincapié en el invernadero sencillo, pasivo (esto es, con bajo consumo de energía para calefacción o mantenimiento), sin alto nivel tecnológico pero bien pensado para aprovechar los recursos naturales de la costa mediterránea, como son la luz y el clima. Por ello el capítulo discute especialmente la transmisión de luz y la ventilación de las estructuras de invernaderos.

## 2. Principales tipos de estructuras en el mediterráneo

### 2.1. Invernaderos autóctonos

La mayoría de las 150.000 Has. aproximadamente de invernaderos en la cuenca mediterránea son de tipos autóctonos, construidos con la experiencia en el uso de los materiales locales de los instaladores de cada zona. En muchos casos, en el diseño de estos invernaderos ha predominado la tradición constructiva de una zona determinada sobre la racionalidad científico-técnica. En el conjunto de invernaderos mediterráneos la madera es el elemento estructural más extendido, y la película de polietileno de distintas propiedades ópticas y mecánicas es el material de cubierta por excelencia.

El invernadero parral y sus versiones derivadas del diseño original plano es el ejemplo más extendido de invernadero autóctono. Sólo en Almería hay aproximadamente 27000 del tipo parral y de su variante de “raspa y amagado” (EFSA, 2009). Sus características constructivas pueden consultarse en diversas fuentes bibliográficas (por

ejemplo, Pérez-Parra, 1998). Desde que en 1961 se cubrieran con plástico los primeros parrales, este invernadero ha tenido un impacto enorme en el desarrollo socio-económico de Almería, así como también en muchos otros países del mundo. El parral ha alcanzado un balance positivo en términos de coste-beneficio y ha permitido la creación de pequeñas empresas familiares (que poco a poco han ido creciendo) debido a la baja inversión inicial.

Sin embargo, bajo el punto de vista técnico todos los tipos de invernaderos autóctonos tienen una serie de limitaciones que conviene señalar y que se resumen en tres puntos:

- La transmisión de luz es baja, sobre todo en las estructuras con techos de poca pendiente (este asunto se discute más adelante).
- Ventilación mal: la superficie de ventanas es muy reducida y el tipo de ventanas (plástico enrollado) suele ser poco eficaz. Con frecuencia no se guarda apenas distancias entre invernaderos, lo que reduce el intercambio de aire (Figura 1).
- En periodos fríos suelen tener exceso de humedad por goteo de la condensación y a veces por entrada de lluvia.

Como consecuencia las producciones son comparativamente bajas y la calidad depende mucho de las condiciones meteorológicas. Posteriormente se marcan pautas para la mejora de la transmisión de luz y de la ventilación.



**Figura 1. Invernaderos parral en Almería con alta ocupación del suelo**

## 2.2. Invernaderos industriales con cubierta plástica

Este grupo incluye una variedad de estructuras generalmente de acero galvanizado, aunque la que más predomina es la de naves adosadas estructura arqueada multitúnel. La cubierta del techo es de filme plástico mientras que los frontales y laterales pueden ser de lámina plástica semi-rígida, como por ejemplo de policarbonato. Es la estructura preferida en el mediterráneo norte (Valencia, Barcelona, sur de Francia y norte de Italia) para producción de hortalizas, flor cortada y plantas ornamentales. En Israel también se prefiere el invernadero industrial a los autóctonos. En Almería se utiliza poco (alrededor del 2 % de la superficie cubierta, EFSA 2009) y lo emplean sobre todo las empresas de semilleros y ornamentales.

Los multitúneles ventilan mejor que los parrales. Suelen tener una ventana cenital por cada nave de invernaderos, aunque a veces tienen dos ventanas en cumbre (Figura 2) lo cual es muy conveniente en condiciones de viento débil aunque no tan útil con brisas moderadas, como se discutirá más adelante. Algunos constructores instalan las ventanas del techo alternando la dirección de apertura a izquierda o derecha, pero tal práctica no tiene base científica alguna y por tanto no es recomendable (Baeza, 2007)

Son invernaderos más estancos y pueden climatizarse (calefacción, ventilación forzada, refrigeración por evaporación, pantallas de sombreado y de ahorro de energía, enriquecimiento carbónico, etc.). Los invernaderos industriales suponen un salto cualitativo frente al grupo de invernaderos autóctonos; con todo no están exentos de problemas:



**Figura 2. Invernadero multitúnel con ventana cenital doble y paredes frontales de policarbonato**



- La condensación. Se acumula en la parte superior del arco donde es difícil de eliminar. Reduce la transmisión de luz (del orden del 9 %, Stanghellini y Montero 2010) y gotea sobre el cultivo. Los invernaderos comerciales de techo puntiagudo o gótico han disminuido, pero no resuelto, este problema.
- La ventilación es insuficiente cuando hay mallas anti insectos en las ventanas. El diseño del sistema de ventilación debe mejorarse.
- El coste sólo de la estructura ronda los 18 €/m<sup>2</sup> para superficies cubiertas mínimas de 1 Ha (Euphoros, Deliverable 5, 2011).

### 2.3. Invernaderos de vidrio

Son las estructuras típicas de países fríos, y el modelo más característico es el Venlo holandés. Se suelen construir en grandes superficies para disminuir costes de instalación y ahorrar energía: por ejemplo, la superficie media en Holanda es de 1,5 Ha con tendencia a aumentar (Bunschoten & Pierik, 2003).

Bajo el punto de vista técnico el invernadero Venlo es excelente, con la única objeción de que la ventilación debe adaptarse a las condiciones del sur de Europa: En zonas más frías los Venlo tienen ventanas del techo discontinuas y no tienen ventilación lateral. En zonas más cálidas se recomienda la ventana del techo continua a lo largo de la longitud del invernadero. También se recomienda combinar la ventilación cenital con la lateral, particularmente en condiciones de viento débil como demuestra el trabajo de Baeza *et al.* (2009).

En los países del Sur de Europa la superficie con cubierta de vidrio es muy escasa. En España no llega al 1 %, y en Almería todavía menos. La razón es obvia: el coste sólo de la estructura es aproximadamente el doble que el del multitúnel (Vanthoor, 2011). Un estudio reciente demuestra que, en clima mediterráneo, el Venlo con equipos de climatización es más rentable que ningún otro tipo de invernadero (Vanthoor, 2011). Para ello es preciso que los precios de los productos hortícolas sean estables y que la financiación de las instalaciones no sea un factor limitante. Como ambas circunstancias son difíciles de mantener, el agricultor opta por inversiones menores con la vista puesta a corto o medio plazo y no elige el invernadero de vidrio.



Figura 3. Invernadero de vidrio modelo Venlo holandés. A veces la altura bajo canal llega a los seis metros

### 3. La transmisión de luz

En la transmisión de luz del invernadero intervienen una serie de factores: las características del material, la orientación del invernadero, la pendiente del techo y los elementos opacos de la estructura (arcos, piezas de fijación, etc.).

En cuanto al material de cubierta otro capítulo de este libro se ocupará de esta materia. Baste aquí decir que los materiales transmiten la máxima radiación solar cuando ésta incide perpendicularmente al material, y que la transmisión cae notablemente a partir de ángulos de incidencia de 45 a 60 °C en función de las características del material. También conviene recordar que, según datos de campo medidos en la costa de Granada (Montero *et al.*, 2001) la acumulación de polvo reduce la transmisión del orden del 6-7 % en plásticos tricapas y del orden del 20 al 30 % en las mallas anti-insectos en función de la porosidad (las mallas menos porosas acumulan más polvo y pierden mayor porcentaje de transmisión).

#### 3.1. Orientación y pendiente del techo del invernadero

En cuanto a la orientación y pendiente del invernadero y su efecto en la transmisión de luz, la Figura 4 ilustra la relación entre estas variables (Castilla, 2005). Son cálculos hechos para la latitud del sur peninsular (37 °C) para invernaderos de techos planos. La Figura 4a compara la transmisión a lo largo del año (de diciembre a junio) de dos invernaderos de pendiente 10 °C (aproximadamente la de los tipos raspa y amagado),

uno de ellos con el eje longitudinal orientado de norte a sur (N-S) y el otro con el eje este-oeste (E-O). Puede verse que en invierno la orientación E-O supera en un 5 % aproximadamente a la N-S, mientras que en junio ocurre lo contrario. En verano se suele sombrear el invernadero, por lo que la transmisión de luz en estos meses no es de interés. En cualquier caso, para esta pendiente de techo las diferencias no son muy grandes.

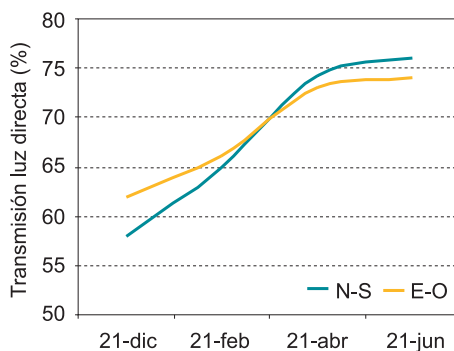
La Figura 4b compara invernaderos de 30 °C de pendiente. En este caso puede observarse que, en los meses de invierno, la orientación E-O transmite del orden de un 15 % más de luz que la N-S. Conforme avanza la estación las transmisiones se acercan, y a partir de abril las diferencias no tienen valor en la práctica.

Comparando las Figuras 4a y 4b se comprueba que los invernaderos de mayor pendiente transmiten más luz en los meses invernales, y por tanto son recomendables sobre los planos o de escasa pendiente. Uno de los motivos de que las producciones en Almería no sean altas es la mala transmisión de luz de la mayoría de las estructuras locales.

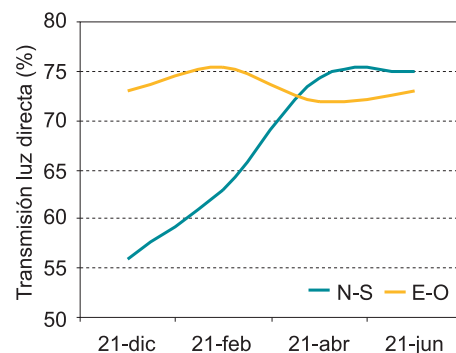
Castilla (2005) comparó distintas pendientes entre 11 y 45 °C con estructuras simétricas y asimétricas, y llegó a la conclusión de que los invernaderos simétricos con pendientes entre 25 y 30 °C son un buen compromiso entre transmisión de luz y coste constructivo. Ésta es la regla general y éstas son las pendientes a respetar; con todo hay algunas estructuras especialmente pensadas para recoger la condensación del techo. Dichas estructuras tienen pendientes mayores, del orden de 45 °C, como se discutirá más adelante.

**Figura 4. Transmisión de luz directa en invernaderos con orientación Norte-Sur y Este-Oeste para la latitud 37° Norte**

**a) Pendiente del techo 10°**



**b) Pendiente del techo 30° (Castilla, 2005)**



Por tanto la orientación E-O es mejor que la N-S en cuanto a la transmisión de luz en invierno. Sin embargo, hay razones que matizan esta afirmación:

- La uniformidad de la luz es mejor en los invernaderos N-S, puesto que las sombras principales de la estructura (las producidas por el canalón y las mallas anti-insectos de las ventanas cenitales) se desplazan a lo largo del día con el movimiento del sol.
- La ventilación es mayor cuando las ventanas cenitales son perpendiculares a la dirección del viento. Por tanto, a veces puede haber conflicto de intereses entre la mejor orientación para transmitir luz o para ventilar.
- En situaciones de conflicto debe estudiarse si es posible mantener la orientación E-O y aplicar medidas compensatorias para aumentar la ventilación (ventanas en los frontales, aumento de superficie de ventanas cenitales, etc.)
- En cualquier caso, independientemente de la orientación del invernadero las líneas de cultivo deben estar orientadas N-S para que el cultivo se desarrolle uniformemente.

### 3.2. Forma del techo: asimétrico, simétrico de techos planos y curvo

Desde los primeros estudios de los sesenta se han publicado diversos análisis comparativos de la transmisión de luz de distintas formas de invernadero, a veces con resultados contradictorios. En España, Castilla *et al.* (1994) realizaron un estudio comparativo de la transmisión de un invernadero parral de techo plano y de otro con cubierta a dos aguas asimétrica (8° sur-18 ° norte). El resultado fue que el modelo asimétrico mejoraba la transmisividad global y reducía la heterogeneidad espacial.

Más tarde, con el objetivo de optimizar la forma del techo de los invernaderos para la latitud 37° N, Soriano *et al.* (2004) estudiaron varias combinaciones de pendiente de cubierta. El estudio concluyó que el incremento de la pendiente aumentaba la transmisividad del invernadero, y además demostró que los modelos asimétricos no mejoran sustancialmente la transmisividad con respecto a los simétricos de alta pendiente. Como además los asimétricos son más caros, la gran mayoría de invernaderos tienen techo simétrico.

En cuanto a la comparación de techos planos simétricos (tipo parral de alta pendiente) y techos curvos, Hernández Barros (2009) hizo un estudio exhaustivo de dos invernaderos E-O con pendiente de 26 °C aproximadamente (para el curvo se consideraba la pendiente como la formada por la recta que une el canalón con la cumbrera y la horizontal). Los resultados de la tesis doctoral de Hernández Barros se pueden resumir así:

- La integral o suma de radiación transmitida en el periodo octubre-marzo fue muy similar en ambas estructuras, aunque en días soleados y en algunos meses del año se midieron pequeños aumentos (4 a 5 %) en el invernadero curvo. En parte estas posibles diferencias pueden deberse a errores experimentales por la posición de los medidores de radiación solar.
- En cuanto a la uniformidad de la radiación los modelos de cálculo pronosticaron la existencia de zonas de baja radiación o sombreado en los extremos de las capillas curvas, cosa que no ocurre con la misma intensidad en los invernaderos de techos planos inclinados.
- En cuanto al régimen de temperatura y humedad, el régimen térmico fue muy similar, mientras que la humedad fue más elevada en el techo curvo. En este sentido se observaron diferentes cantidades de condensación en las mañanas proclives a ello: la condensación permaneció más tiempo en el curvo que en el plano debido en parte a la forma del techo y en parte a la mayor estanqueidad del invernadero curvo.
- En cuanto a la respuesta del cultivo se observaron distintas zonas de desarrollo en función de los niveles de radiación solar. Sin embargo la producción final comercial no fue significativamente diferente.

Como conclusión global este estudio señala que para cultivos con manejo pasivo (sin calefacción ni otro tipo de control climático), en la costa mediterránea andaluza el parral de techo simétrico y pendiente de 26 °C es igual de productivo y más económico que el multitúnel, y por tanto es más recomendable.

Muy probablemente un parral evolucionado sobre los que ya existen, es decir, bien orientado, con mucha mayor pendiente del techo y sobre todo, con mucha más ventilación es un invernadero de gran interés para la producción de hortalizas en Almería, siempre y cuando no se usen equipos de climatización como la calefacción, que en los parrales es muy ineficaz. Sin embargo puede ocurrir que con tantas mejoras estructurales el coste final del parral sea parecido al del multitúnel, con lo cual a igualdad de precio las estructuras industriales tienen ventajas sobre las construidas localmente.

## 4. La ventilación natural

### 4.1. Introducción

La ventilación es un aspecto crucial en los invernaderos de zonas cálidas, porque de ella depende más que de ningún otro factor el control de la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>. La ventilación mecánica controla el intercambio de aire del invernadero con el aire exterior con independencia de las condiciones meteorológicas. Sin embargo los invernaderos con ventilación mecánica son testimoniales. En cambio la ventilación natural de un modo u otro está presente en todos los invernaderos.

La ventilación es debida a la diferencia de presión del aire a ambos lados de las ventanas. La diferencia de presión tiene dos causas: efectos eólicos y efectos térmicos.

- Efectos eólicos: el viento crea un campo de presiones sobre la estructura, con zonas de presión positiva y negativa. Además, el viento tiene un carácter fluctuante, pues no mantiene una velocidad y una dirección constantes. La mayoría de estudios señalan que el intercambio de aire es directamente proporcional a la velocidad del viento.
- Efectos térmicos. Si el aire del invernadero está a diferente temperatura que el exterior también tiene diferente densidad y diferente presión. Si el viento exterior es muy débil el aire del invernadero tiende a estratificarse, con el aire más cálido y menos denso en la parte superior. En esas condiciones el aire tiende a salir por las ventanas más altas del invernadero y a entrar por las más bajas

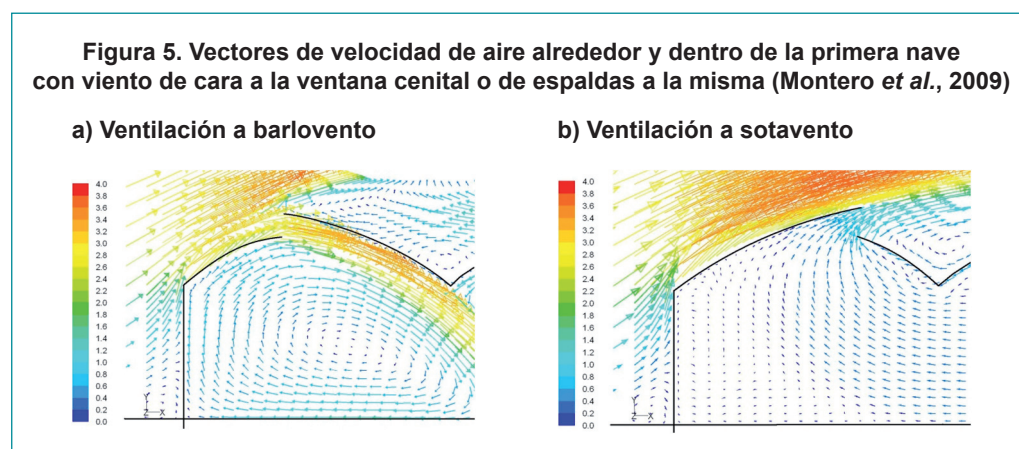


El efecto eólico predomina sobre el térmico en la gran mayoría de casos. Hay estudios que demuestran que a partir de vientos de  $2 \text{ m s}^{-1}$  el efecto térmico puede despreciarse (Bot, 1983). Sin embargo en condiciones de vientos muy débiles es cuando predomina la ventilación térmica y es importante diseñar el sistema de ventilación para que el invernadero pueda responder bien en estas circunstancias (Baeza *et al.*, 2009).

En lo que sigue se discuten distintos aspectos de la ventilación natural de los invernaderos en base a dos tesis doctorales llevadas a cabo en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, la primera sobre el análisis del invernadero parral (Pérez Parra, 2002) y la segunda, continuación de la primera, sobre la optimización de la ventilación de dichos invernaderos (Baeza, 2007).

## 4.2. Ventanas cenitales a barlovento o a sotavento

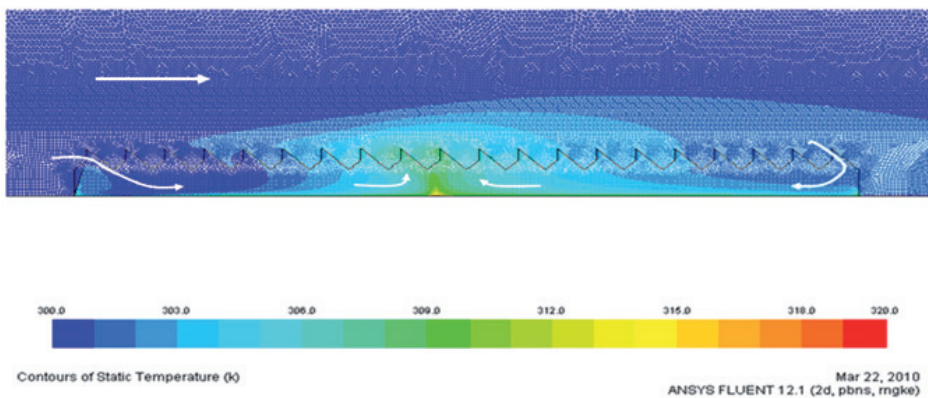
Si los laterales están cerrados, el flujo de aire en el invernadero es muy distinto cuando las ventanas del techo están abiertas de cara a los vientos dominantes (barlovento) o de espaldas a los mismos (sotavento). La Figura 5 ilustra este hecho. Se muestran los campos de velocidad obtenidos con la técnica CFD del aire fuera y dentro de la primera nave. Las zonas de color naranja o rojo son las de más velocidad, y las verdes y azules las de menos.



Con la ventilación a barlovento (Figura 5a) la ventana cenital “captura” el aire exterior: se forma una zona de recirculación en la primera nave, pero la mayoría del aire entrante se desplaza hacia las otras naves en el mismo sentido que el aire exterior. La ventana cenital de la primera nave es la más importante en cuanto a la entrada de aire de todo el invernadero. Con ventilación a sotavento el aire exterior se acelera cerca de la ventana cenital: a mayor velocidad del aire menor es su presión (principio de la conservación de la cantidad de movimiento), por tanto hay una zona de presión negativa en la primera ventana que hace que el aire salga del invernadero. El aire interior se desplaza en sentido contrario al aire exterior.

Cuando los laterales están abiertos no es tan importante la orientación de las ventanas del techo, porque la ventana lateral tiene mayor efecto en la ventilación que las cenitales, sobre todo si el invernadero es relativamente estrecho los laterales son mucho más importantes en invernaderos estrechos que en anchos, Baeza *et al.*, 2009). Una limitante de la ventilación a barlovento es la anchura del invernadero; la Figura 6 ilustra la distribución de temperatura en un invernadero de 100 m de ancho con ventanas a barlovento. El aire exterior más frío va recorriendo el invernadero y se va calentando. Por este motivo se pueden formar bolsas de calor en las zonas centrales de invernaderos anchos que se pueden limitar si se acorta la distancia entre laterales.

**Figura 6. Mapa de temperatura en un invernadero de 100 me de anchura con ventilación a barlovento. Se observan zonas más cálidas en el centro del invernadero. (Montero, 2010)**



Respecto a la orientación de las ventanas se puede concluir lo siguiente:

- La ventilación es mayor con las ventanas cenitales a barlovento (casi el doble según los trabajos citados). Por ello es recomendable en países cálidos
- La ventilación a sotavento produce un movimiento interior del aire más uniforme, además de ser más segura en cuanto a los posibles daños del viento en las ventanas. Por eso suele preferirse en países más fríos.
- Con ventilación a barlovento, o con ventanas laterales abiertas, debe limitarse la anchura de los invernaderos (orientativamente a 50 m) para evitar zonas de calor en el centro de los invernaderos.

### 4.3. Ventanas cenitales enrollables o abatibles

En los invernaderos, sobre todo en los parrales, la mayoría de ventanas son enrollables o abatibles. Las primeras se abren o cierran por la rotación de un eje que enrolla o desenrolla el plástico mientras que las segundas tienen un mecanismo basculante de apertura y cierre generalmente accionado por un motor eléctrico (Figura 7).

**Figura 5. Vectores de velocidad de aire alrededor y dentro de la primera nave con viento de cara a la ventana cenital o de espaldas a la misma (Montero y col, 2009)**

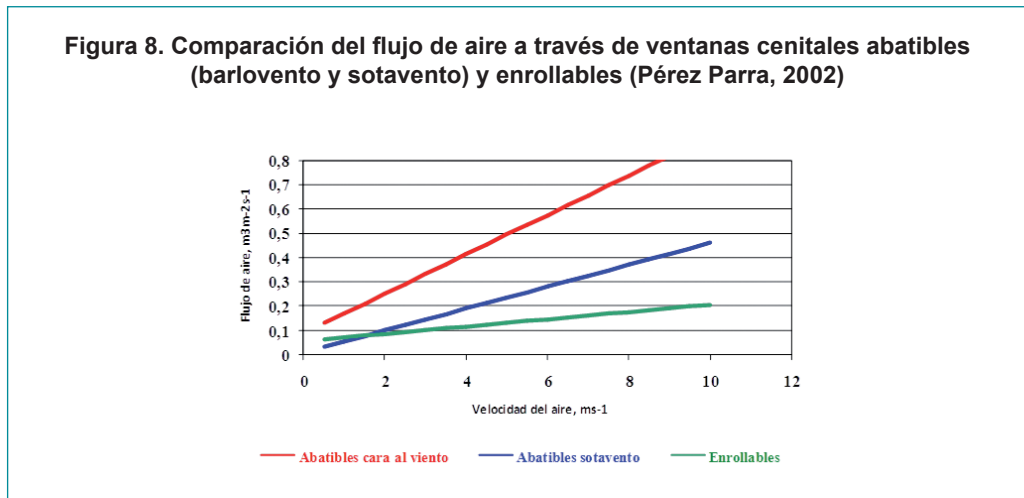
**a) Ventanas abatibles en techo y enrollables en laterales**



**b) Enrollables en techo**



En el techo, a igualdad de superficie de ventilación las ventanas abatibles son más eficaces que las enrollables (Figura 8, Pérez parra, 2002). La Figura 8 muestra el flujo de aire por unidad de superficie de ventana en función de la velocidad del viento.



Los resultados de la comparación se pueden resumir así:

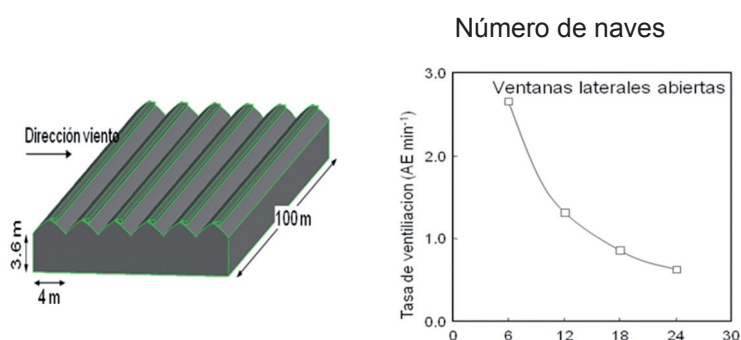
- En todas las ventanas la ventilación aumenta proporcionalmente con el viento exterior.
- En el techo, las ventanas abatibles a barlovento prácticamente doblan la ventilación de las ventanas a sotavento.
- La orientación de las del tipo enrollables a barlovento o sotavento no tuvo ningún efecto práctico.
- Independientemente de su orientación las abatibles en el techo ventilan mejor que las enrollables y por tanto son recomendables.
- Para las ventanas laterales (datos no mostrados en la Figura) las enrollables frenan menos la entrada y salida del aire (mayor coeficiente de descarga)

## 4.4. Importancia de la ventilación lateral

En comparación con la ventilación cenital, las ventanas laterales aumentan enormemente la ventilación del invernadero y son esenciales tanto en condiciones de vientos nulos o débiles (Baeza *et al.*, 2009) como en condiciones de vientos moderados (Kacira *et al.*, 2004). Se recomienda vivamente el uso combinado de ambas ventanas, laterales y cenitales.

La Figura 9 muestra la tasa de ventilación (en intercambios de aire por minuto) en función del número de naves del invernadero. En este estudio la anchura de las naves fue de 4 m, parecida a las naves del invernadero Venlo. Puede verse que la tasa de ventilación disminuye con la anchura del invernadero, porque conforme aumenta el número de naves aumenta el volumen del invernadero pero la superficie de ventanas laterales es la misma en todos los casos. Aún así, incluso en invernaderos de 24 naves (96 m de ancho en este caso) la ventilación lateral tuvo más importancia que la ventilación cenital sola. Además es más económico construir una ventana lateral que una cenital.

Figura 9. Tasa de ventilación en función del número de naves. Kacira (2004)

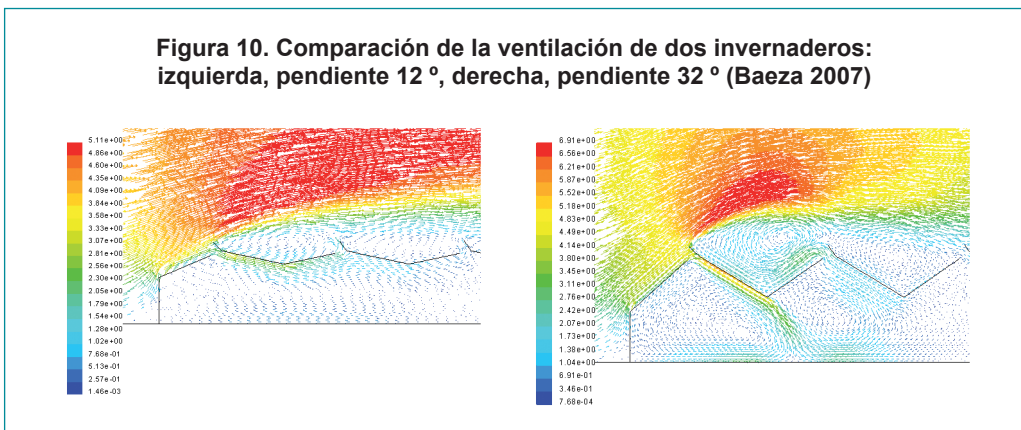


Sin embargo algunos agricultores son reacios a abrir las ventanas laterales para evitar daños del viento en los cultivos o para disminuir la incidencia de plagas. Por este motivo algunos diseños de invernaderos incorporan deflectores que redirigen el aire y protegen al cultivo. Más adelante se discutirá el uso de deflectores.

#### 4.5. Pendiente del techo

La pendiente del techo tiene importancia en la ventilación. Baeza (2007) comparó la ventilación de parrales con pendientes desde  $12^\circ$  hasta  $32^\circ$  y observó que la ventilación aumenta al aumentar la pendiente, bien es verdad que a partir de  $25^\circ$  de pendiente el aumento de la ventilación fue escaso. La Figura 10 compara invernaderos de  $12^\circ$  y de  $32^\circ$ ; en el primer caso gran parte del aire entrante por la primera ventana sale por la segunda sin mezclarse apenas con el aire interior. En cambio, en el invernadero de mayor pendiente el techo actúa a modo de deflector, dirigiendo el aire entrante hacia la zona de cultivo.

La recomendación es clara: deben desecharse los invernaderos planos o de escasa pendiente. Curiosamente este consejo también atañe a la transmisión de luz, y por tanto es doblemente recomendable construir invernaderos de al menos  $25^\circ$  de pendiente.

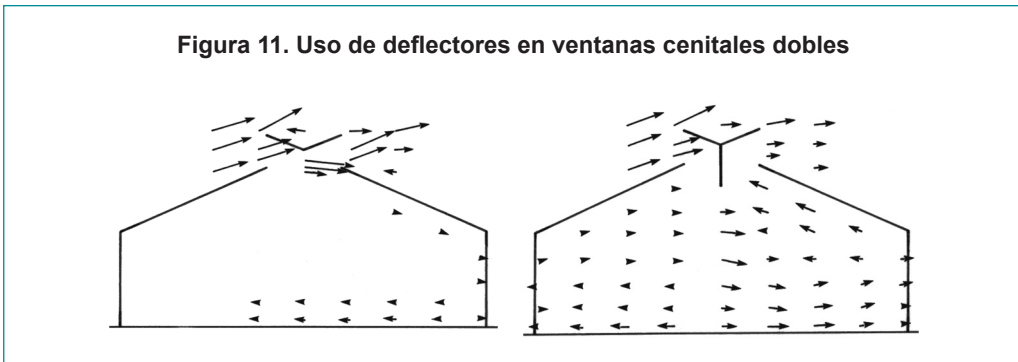




## 4.6. Uso de deflectores

Las ventanas dobles o de mariposa actúan muy bien en condiciones de vientos débiles. Sin embargo en condiciones de viento el aire externo puede pasar de un lado al otro de la ventana sin entrar en el invernadero. Por este motivo algunos autores como Nielsen (2002) recomiendan el uso de deflectores en las ventanas dobles (Figura 11). Es buena solución técnica aunque no es siempre práctica, ya que se trata de construir una pantalla vertical transparente en la cumbre de cada nave. Otra opción posible es gestionar la apertura y cierre de ventanas de otra manera: en lugar de abrir y cerrar los dos lados al mismo tiempo se puede abrir uno u otro lado en función de la dirección del viento, y en caso de viento muy débil se pueden abrir los dos lados para dejar escapar el aire por efecto térmico.

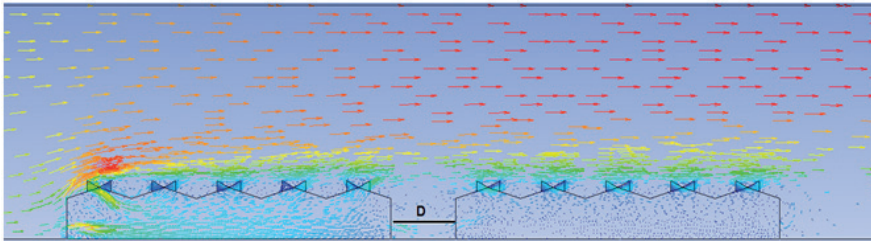
Figura 11. Uso de deflectores en ventanas cenitales dobles



## 4.7. Distancia entre invernaderos y su efecto en la ventilación

Si hay dos o más invernaderos próximos el primer invernadero que recibe el viento actúa de “pantalla sobre los demás. La Figura 12 muestra el campo de velocidad del aire en el exterior e interior de dos invernaderos. Las zonas de color rojo son las de mayor velocidad y las azules las de menos. El viento exterior va de izquierda a derecha, incide sobre el primer invernadero y deja al segundo en una especie de “sombra”. En consecuencia la ventilación del segundo invernadero es más débil.

**Figura 12. Velocidad del aire en dos invernaderos.  
El invernadero de la izquierda obstruye el movimiento del aire sobre el de la derecha**

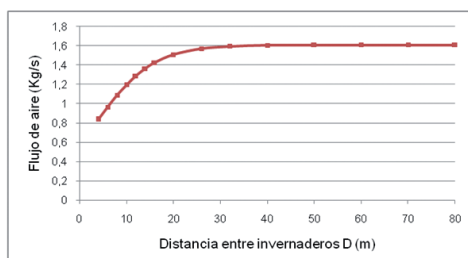


¿Qué distancia sería recomendable guardar entre invernaderos? ¿Qué anchura deben tener estos? ¿Cómo afecta el tamaño del obstáculo a la ventilación? Estas preguntas no se pueden responder a ciencia cierta todavía. Los estudios más recientes (Euphoros, deliverable 14, 2011) aportan algo de luz a este problema.

La Figura 13 muestra la ventilación del segundo invernadero (el obstaculizado) en función a la distancia  $D$  entre ellos. La Figura se refiere sólo al invernadero multitúnel con ventanas a barlovento y velocidad del viento exterior de 3 m/s, aunque otros tipos de invernaderos presentan un comportamiento parecido. Puede verse que cuando la separación  $D$  es pequeña (por ejemplo 4 m) el flujo del aire del segundo invernadero es de 0,8 Kg/s. Conforme aumenta la distancia aumenta la ventilación, hasta llegar a una distancia de 30 m para la que la ventilación es de 1,6 Kg/s, es decir, el doble que cuando la separación era de 4 m. A partir de 30 m de separación no se observan diferencias apreciables.

Por tanto la situación ideal sería dejar unos 30 m de distancia entre invernaderos. En zonas como la costa mediterránea no es posible mantener estas distancias. Por tanto conviene compensar la reducción de la ventilación con mejoras en el diseño de los sistemas de ventilación.

**Figura 13. Ventilación de un invernadero multitúnel en función de la distancia de separación con un obstáculo al viento**



Lo dicho hasta ahora respecto a la ventilación natural se puede resumir así:

- La mejora de la ventilación es un aspecto crítico para lograr que la horticultura mediterránea bajo invernadero siga avanzando.
- Las ventanas a barlovento producen mayor intercambio de aire que las ventanas a sotavento, y por ello son preferibles. Deben protegerse con automatismos para evitar roturas por rachas de viento.
- La combinación de ventanas laterales y cenitales es muy recomendable, incluso en invernaderos de grandes dimensiones (más de 100 m de ancho).
- Se aconseja limitar la anchura de los invernaderos a no mucho más de 50 m.
- Se recomienda aumentar la pendiente del techo del invernadero (no menos de 25° de pendiente).
- Se recomienda aumentar el tamaño y número de las ventanas, muy por encima de la superficie de ventanas de los invernaderos de raspa y amagado.
- El uso de deflectores o la gestión independiente de las ventanas dobles del techo es también recomendable.
- En lo posible, guardar distancias de separación entre invernaderos.

## 5. Nuevos tipos de invernaderos

### 5.1. Invernaderos semi-cerrados

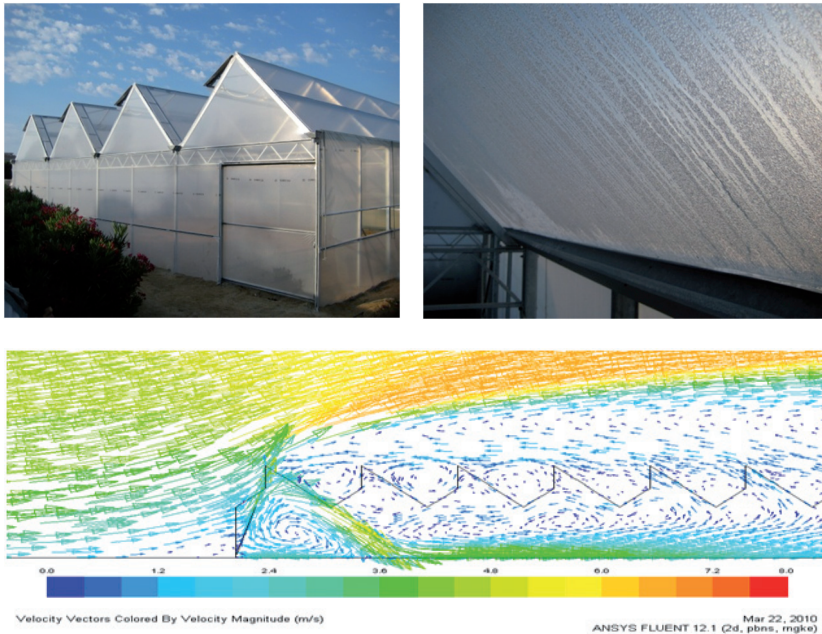
Mantener el invernadero más tiempo cerrado presenta una serie de ventajas:

- Es posible mitigar la oscilación térmica del día a la noche si parte del calor sobrante durante el día se almacena para ser usado durante la noche.
- El consumo de agua se reduce considerablemente. En algunos casos el vapor de agua puede condensarse y usarse de nuevo para el riego. Además al ser el ambiente más húmedo la demanda hídrica es menor.
- Al estar el invernadero más tiempo cerrado se puede aplicar durante mayor número de horas el enriquecimiento carbónico (Stanghellini *et al.*, 2008)
- El invernadero cerrado evita la entrada de plagas, con la consiguiente reducción de tratamientos químicos.

El inconveniente principal es la mayor humedad ambiental, causante de pérdidas en la calidad y la cantidad de los productos hortícolas (Baptista, 2007). Sería deseable que el invernadero fuera capaz de recoger la condensación del techo para evitar el goteo sobre el cultivo.

En el IRTA (Cabrils, Barcelona) se ha desarrollado un invernadero que pretende estar más horas cerrado en los meses fríos. Se ha diseñado con gran pendiente en el techo (45°) y naves más estrechas (4,8 metros). Del canalón al suelo este invernadero es muy parecido al Venlo holandés, aunque el techo es diferente. Debido a la pendiente la condensación escurre hacia los canales de recogida.

La ventilación también tiene algunos rasgos de interés: por una parte aumenta el número de ventanas, porque las naves son más estrechas y cada nave cuenta con una ventana cenital. Por otra parte, como puede verse en la Figura 14, el techo de la primera nave actúa como deflector y redirige el aire entrante hacia la zona de cultivo.

**Figura 14. Invernadero de pendiente de 45° para escurrir la condensación. Irta. Cabrils**

Las nuevas estructuras anti condensación con gran superficie de ventanas aumentan la temperatura en periodos fríos y controlan el exceso térmico en periodos cálidos. Son por tanto de gran interés en la mejora de los invernaderos pasivos mediterráneos.

## 5.2. Inversos (Fundación Cajamar)

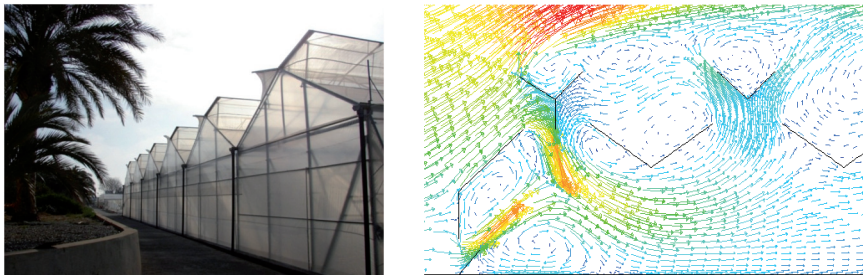
El invernadero Inversos (Figura 15) recoge muchas de las mejoras estructurales recomendadas anteriormente. Desde el canalón hasta el suelo el Inversos se parece mucho al multitúnel. El techo es de caras planas, pero lo que diferencia a esta estructura frente a las demás es sobre todo su superficie de ventilación cenital, con ventanas dobles de 1,9 m cada una. Hay dos Inversos construidos en la finca de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar. El segundo tiene ventanas cenitales ligeramente más pequeñas para evitar posibles aleteos del plástico en la zona de mayor exposición al viento.

Debido esencialmente a la mejora de la ventilación, en comparación con las estructuras tradicionales el Inversos alarga el ciclo de producción, evita o disminuye enormemente la necesidad de sombrear, y sin la ayuda de la calefacción ni de ninguna otra técnica de climatización logra producciones anuales superiores a los 30 Kg/m<sup>2</sup> en tomate (aún superiores si se usa el “intercropping” es decir, plantando el siguiente cultivo antes de que termine el primero).

El Inversos es una demostración de que la investigación no es sólo útil sino imprescindible. Las innovaciones no salen de la nada, sino del trabajo de muchos años y de muchas personas con formación científica y técnica muy especializada. Las innovaciones no surgen de la improvisación sino del trabajo inteligente, independiente y sereno: después de muchos años de estudio se llega a diseñar, construir y evaluar una estructura que funciona muy bien y que tiene un coste asequible. Este esfuerzo necesita ser financiado en su mayoría con dinero público, pues es la única manera de hacer investigación independiente de intereses particulares, así como distanciada del “cortoplacismo” con miras a lo inmediato.

El invernadero Inversos, así como otros desarrollos asociados a la producción en invernadero, es una demostración de que la horticultura sur mediterránea española tiene a la mano el poder dar un salto cualitativo mediante la aplicación de tecnología desarrollada en la propia zona.

**Figura 15. Invernadero Inversos: esquema de la ventilación**





## Referencias bibliográficas

- Baeza, E. J. (2007): Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernaderos tipo parral. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.
- Baeza, E. J.; Perez-Parra, J.; Montero, J. I.; Bailey, B.; Lopez, J. C. y Gazquez, J. C. (2009): "Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics"; *Biosystems Engineering*, 104 (1); pp. 86-96.
- Baptista, F. (2007): "Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting"; *Botrytis Cinerea* infection. PhD Thesis. Universidade de Évora.
- Bot, G. P. A. (1983): "Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model". *PhD dissertation*, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- Bunschoten, B. y Pierik, C. (2003): Kassenbouw neemt weer iets toe. CBS Webmagazine (Centraal Bureau voor de Statistiek) Available from: <http://www.cbs.nl/nl-NL/default.htm>
- Castilla, N. y Lopez Galvez, J. (1994): Vegetable response in improved low cost plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, (361); pp. 44-56
- Castilla, N. (2005): Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- EFSA (2009): EFSA-PPR project on "Data-collection of existing data on protected crop systems (greenhouses and crops grown under cover) in Southern European EU Member States". Ed. N. Sigrimis. Agricultural University of Athens
- EUPHOROS consortium (2011): Deliverable 5. Report on environmental and economic profile of present greenhouse production systems. Coordinator, J. I. Montero. <http://www.euphoros.wur.nl/UK/Deliverables>

- EUPHOROS consortium (2011): Deliverable 14. Baeza, E.; Montero, J. I. y Bailey, B. Available. <http://www.euphoros.wur.nl/UK/Deliverables>.
- Hernández Barros (2009): "Valoración radiativa, microclimática y productiva de dos invernaderos con diferente geometría de cubierta (hemicircular y lineal simétrica a dos aguas)"; Tesis doctoral, Universidad de Almería. p. 258.
- Kacira, M.; Sase, S. y Okushima, L. (2004): "Effects of Side Vents and Span Numbers on Wind-Induced Natural Ventilation of a Gothic Multi-Span Greenhouse" *JARQ*, 38(4); pp. 227-233.
- Montero, J. I.; Castilla, N.; Antón, A. y Hernández, J. (2001): "Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses". *Acta Horticulturae* (559); pp. 203-209.
- Montero, J. I.; Stanghellini, C. y Castilla, N. (2009): "Greenhouse Technology for Sustainable Production in Mild Winter Climate Areas: Trends and Needs"; *Acta Horticulturae*, (807); pp. 33-46.
- Montero, J. I. (2010): "Tendencias tecnológicas en las invernaderos mediterráneos"; *Capítulo V. En Manejo del Clima en el Invernadero Mediterráneo*. Edita IFAPA- AI-881-2010.
- Nielsen, O. F. (2002): "Natural ventilation of a greenhouse with top screens". *Biosys. Eng.* (81); pp. 443-452.
- Pérez-Parra, J. (1998): "Invernadero Parral Almería y su evolución. Tecnología de Invernaderos II"; FIAPA, Caja Rural de Almería. ISBN: 84-88246-10-2.
- Pérez-Parra, J. (2002): "Ventilación natural de invernaderos tipo parral"; Tesis doctoral. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba.
- Pérez Parra, J.; Baeza, E.; Montero, J. I. y Bailey, B. J. (2004): "Natural Ventilation of Parral Greenhouses"; *Biosystems Engineering*, 87(3); pp. 355-366.

- Soriano, T.; Montero, J. I.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Medrano, E.; Antón, A.; Hernández, J.; Morales, M. I. y Castilla, N. (2004): "Characterisation of Direct Radiation transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and simulation Models"; *Journal of Biosystems Engineering*, 88(2); pp. 243-253.
- Stanghellini, C.; Incrocci, L.; Gázquez, J. C. y Dimauro, B. (2008): "Carbon dioxide fertilization in Mediterranean greenhouses: how much lost production?" *Acta Horticulturae*, (801); pp. 1.541-1.550.
- Stanghellini, C.; Montero, J. I. (2010): "Resource use efficiency in protected cultivation: towards the greenhouse with zero emissions"; ISHS Lisbon. *Acta Horticulturae* in press.
- Vanthoor, B. (2011): "A model-based greenhouse design method"; PhD Thesis; p. 307. Universidad de Wageningen.



## MATERIALES DE CUBIERTA PARA INVERNADEROS

*Enrique Espí  
Centro de tecnología Repsol*

### RESUMEN

En este capítulo se resumen las principales propiedades que puede ofrecer un material de cubierta, especialmente los filmes plásticos flexibles, y cómo éstas pueden ayudar al correcto manejo del invernadero optimizando su productividad y rendimiento económico. Se describen las propiedades ópticas del mismo (transmisión de la radiación PAR, ultravioleta, infrarroja próxima o lejana, la difusión, la luminiscencia), sus propiedades superficiales (antigoteo o antipolvo) y más brevemente otras como la duración. Así mismo, y sin pretender ser un manual exhaustivo ni sustituir al consejo de un experto, se dan algunas recomendaciones para la correcta elección del material de cubierta.

### SUMMARY

*In this chapter we have summarized the main properties of materials for greenhouse covering, specially flexible plastic films, and how they can help to the a good greenhouse management, optimizing both yield and economic profit. Optical properties (PAR, ultraviolet, and near and middle infrared transmission, light diffusion and luminescence), surface properties (antifog and antidust effects), and duration are described. Not being a handbook nor trying to replace the expert assessment, some recommendations about the correct choice and use of covering materials are provided.*

## 1. Introducción

El material de cubierta del invernadero influye en algunas de las variables que más afectan al cultivo como luz, temperatura o humedad y debe ser cuidadosamente elegido junto a la estructura para ayudar al manejo y optimizar el rendimiento del invernadero (Castilla, 2004 y Catilla y Hernández, 2005). Entre los posibles materiales de cubierta, los materiales plásticos, especialmente los filmes flexibles, son los que ofrecen una variedad más amplia de propiedades y el mejor balance coste / propiedades. En este capítulo se repasan las propiedades ópticas, térmicas y superficiales que pueden tener los materiales de cubierta y su relación con las variables ambientales del invernadero.

## 2. Materiales plásticos

Los materiales plásticos empleados como cubiertas de invernadero se pueden clasificar en filmes flexibles, placas rígidas y mallas, aunque el empleo de los primeros supera con mucho a las otras dos opciones (Díaz *et al.*, 2001).

Los filmes plásticos utilizados para cubierta de invernadero habitualmente tienen espesores comprendidos entre 80 y 220 micrómetros y anchos de hasta 20 metros. En mercados avanzados se pueden encontrar filmes monocapa y tricapa. Respecto a los polímeros utilizados, el polietileno de baja densidad (LDPE), y los copolímeros de etileno y acetato de vinilo (EVA) y acrilato de butilo (EBA) representan más del 80 % del mercado mundial, el cual incluye también PVC en Japón y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) en el resto del mundo.

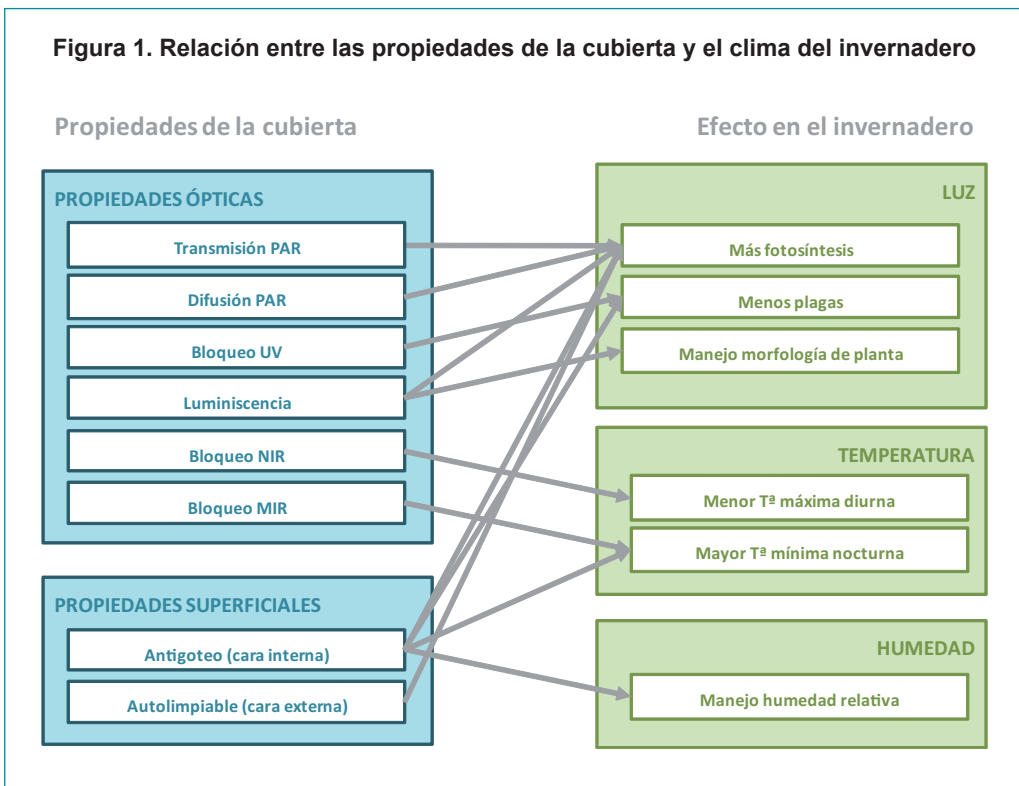
Fue a partir de los años 40, pero sobre todo de los 70, que se empezó a desarrollar la aplicación del polietileno y sus copolímeros para cubierta de invernadero (Garnaud, 2000). El material idóneo para esta aplicación debe ser, además de conformable en forma de película, fotoestable, para mantener sus propiedades durante largos tiempos de exposición al sol; transparente a la radiación visible, para permitir a la planta realizar la fotosíntesis; opaco a la radiación infrarroja, para evitar la pérdida de calor por radiación durante la noche, e hidrófilo, para evitar la condensación de agua en forma de gotitas.



Uno podría pensar que el polietileno o sus copolímeros tienen todas estas propiedades, por lo que son adecuados para la aplicación. Pues, bien al contrario, el polietileno es poco fotoestable, muy transparente a la radiación infrarroja, hidrófobo y no especialmente transparente al visible. Las únicas propiedades en las que destaca frente a otros materiales poliméricos son que puede ser transformado por extrusión-soplado en filmes de grandes anchos y espesores considerables y que es relativamente barato.

¿Por qué se utiliza entonces el LDPE para la fabricación de filmes agrícolas? Porque todas las propiedades que le faltan pueden ser aportadas por medio de aditivos: los estabilizantes a la luz lo hacen fotoestable, las cargas minerales lo hacen opaco al infrarrojo, los surfactantes lo hacen hidrófilo, etc. Por tanto, un compuesto de polietileno con los aditivos adecuados puede ser el material idóneo para la fabricación de filmes agrícolas.

**Figura 1. Relación entre las propiedades de la cubierta y el clima del invernadero**

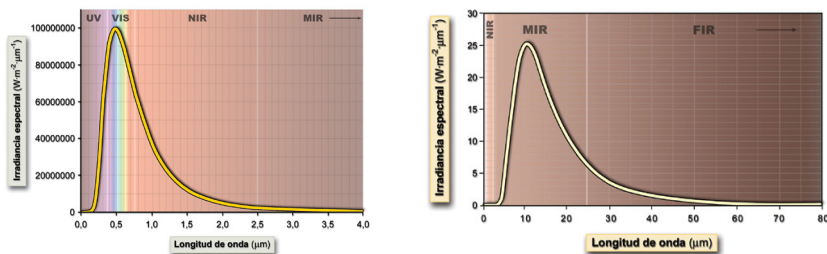


Sin embargo, la elaboración de una aditivación correcta no es un asunto trivial. Las distintas condiciones climáticas y ambientales en las que se va a utilizar la película, el tipo de cultivo, la estructura del invernadero, las incompatibilidades y sinergias entre distintos aditivos, etc. hacen necesario un considerable esfuerzo tecnológico para poder ofrecer una gama de compuestos agrícolas competitiva. Se trata, por tanto, de un negocio de *especialidades* y la elección de la cubierta adecuada requiere conocer la relación entre las propiedades del material y las variables del invernadero que más afectan al cultivo: luz, temperatura y humedad.

### 3. Los materiales de cubierta y la luz

A continuación revisaremos las diferentes zonas en las que se dividen las radiaciones solar y terrestre y los distintos efectos que se pueden conseguir en cada una de ellas y sobre los cultivos mediante el empleo de filmes plásticos como abrigos agrícolas. El resultado que se obtenga dependerá de la región del espectro sobre la que actúen. Aunque aquí se traten separadamente para simplificar su explicación, en la realidad es frecuente que un material de cubierta incorpore simultáneamente varios efectos (por ejemplo, un filme térmico difusor antiplagas).

**Figura 2. Zonas del espectro solar (izquierda) y terrestre (derecha) a tener en cuenta en el manejo de la cubierta y el invernadero**



Con respecto al manejo de la luz es importante considerar, además del fenómeno de absorción o bloqueo de determinadas longitudes de onda, otros fenómenos físicos como la difusión o dispersión de los rayos solares, que provoca una desviación de los mismos en todas las direcciones, o la luminiscencia que es la transformación de radiación de una determinada longitud de onda en otra de longitud superior, por ejemplo, de verde a roja.

**La radiación PAR.** La banda visible (VIS) se sitúa entre 0,38 y 0,76 micras de longitud de onda. Se denomina así por motivos obvios: de todo el espectro electromagnético, el ojo humano sólo es capaz de ver la radiación cuyas longitudes de onda están dentro de ese intervalo. El subintervalo comprendido entre 0,4 y 0,7 micras, que supone aproximadamente un 50 % de la radiación solar recibida por la planta, es la que utilizan los cultivos para llevar a cabo el fenómeno de la fotosíntesis. Por ese motivo, dicha radiación se denomina radiación fotosintéticamente activa (PAR, de las palabras inglesas *Photosynthetically Active Radiation*).

Una pequeña fracción de toda la energía luminosa que llega a la planta es absorbida por el cultivo y directamente utilizada en el proceso de fotosíntesis. La restante se transforma en calor y contribuye, junto a la energía sin acción biológica directa, al calentamiento de la planta (calor sensible) y a la transpiración (calor latente). La baja intensidad luminosa es el factor ambiental más limitante para la fotosíntesis y el desarrollo máximo de los cultivos, sobre todo en determinadas latitudes y especialmente en condiciones de invernadero en los meses de invierno, por lo que siempre se debe elegir el material de cubierta que aporte una mayor transmisión en esta zona de radiación, salvo que exista otro factor que aconseje limitarla (por ejemplo, exceso de temperatura).

**Filmes claros y difusores.** La intensidad de la radiación solar en el interior de un invernadero cubierto por un filme plástico es siempre menor que la que hay en el exterior debido a la reflexión y absorción del material de cerramiento, que dependen del tipo, espesor, grado de limpieza (polvo o algas), condensación de agua y estado de degradación del plástico usado, así como de la orientación y forma de la cubierta, de la época del año y del resto de los elementos que configuran el invernadero (estructura, tutorado, mallas, canales de pluviales, etc.). La pérdida de transmisión debida al filme se puede estimar entre un 5 y un 40 % en función de los distintos puntos comentados.

Por todo lo anterior, es evidente que el requerimiento general que deben cumplir los filmes plásticos para aplicaciones agrícolas es permitir la máxima transmisión global de luz visible en la zona PAR (TGLV) durante toda su vida útil. Las normas ISO 13468-2 y ASTM D 1003 sirven para medir cuál es la transmisión luminosa de los filmes, tanto la global o TGLV como la difusa, que es la que se desvía más de 2,5° respecto a la dirección del haz de luz incidente. El porcentaje de ésta última sobre la global se denomina turbidez (*haze*). Estos conceptos son muy importantes y a veces plantean cierta confusión, especialmente cuando no se miden con equipos apropiados y se confía en la observación visual. A continuación se da una serie de definiciones y ejemplos para tratar de aclararlos:

- Un filme agrícola claro es aquél a través del cual pueden verse los objetos nítidamente. Por ejemplo, estos podrían ser los cultivos, si es que se mira desde fuera de un invernadero hacia dentro.
- Un filme agrícola difusor es el que deja pasar la luz pero no deja ver nítidamente los objetos que hay al otro lado. Se le llama así por su efecto de difundir la luz, es decir, de transformar los rayos procedentes de un foco luminoso como es el Sol en luz que se propaga en todas las direcciones. Otra forma de denominar este tipo de filmes es con la palabra turbio, de ahí el concepto de turbidez mencionado arriba. Un filme se considera difusor cuando su turbidez es igual o superior al 30 % para espesores entre 70 y 150 micras y al 35% para espesores iguales o superiores a 150 micras (EN 13206).

Los filmes difusores se preparan añadiendo en la formulación aditivos inorgánicos, térmicos o no, compuestos por partículas microscópicas que hacen que la luz choque contra ellas y se desvíe de la dirección incidente hacia todas las direcciones. Debido a su aspecto blanquecino o lechoso puede parecer a simple vista que la TGLV es inferior. Sin embargo, si se mide, se puede observar que, según sea la composición, ésta puede ser realmente inferior, igual o incluso superior a la de un filme claro de las mismas características. Simplemente disminuye la componente directa frente a la difusa en el total de la luz transmitida.

En zonas de clima mediterráneo (poca nubosidad, alta irradiación y escasez de lluvia) se recomienda emplear filmes difusores, debido a que la transmisión de luz no es excesivamente limitante y evitan sombras dentro del invernadero y quemaduras en

las plantas. En climas más húmedos se prefieren filmes lo más claros posible ya que, en este caso, el factor limitante suele ser la transmisión de luz, la turbidez del filme no es necesaria puesto que la componente mayoritaria de la radiación global es ya difusa por la nubosidad.

**La acumulación de polvo: filmes autolimpiables.** La utilización de materiales de cubierta en base a copolímeros EVA o EBA puede conllevar una mayor acumulación de polvo respecto al LDPE, especialmente si se utilizan filmes monocapa en latitudes mediterráneas como el sudeste español, con poca lluvia y zonas desérticas y arenosas próximas. Este hecho provoca una pérdida progresiva de transmisión de luz a lo largo de la vida útil de la cubierta, que será proporcional al polvo que se vaya depositando. La cantidad de polvo se hace máxima en los veranos que es cuando la pluviometría es mínima y disminuye en los otoños e inviernos por el lavado de la lluvia.

En la actualidad se están introduciendo en el mercado materiales para cubierta de invernadero con propiedades autolimpiables mediante la modificación del ángulo de contacto que el agua forma sobre la superficie, presentando lo que se conoce como “efecto *Loto*” o “autolimpiante”. El desarrollo de superficies sintéticas autolimpiantes se basa en la particular estructura de la superficie de las hojas de la planta de loto (*Nelumbo nucifera*), que es una combinación de dos estructuras rugosas, una en la microescala y otra en la nanoescala. La primera está formada por células superficiales que forman protuberancias, mientras que la segunda está formada por nanocristales de ceras que recubren la superficie de esas células. Esta estructura imparte a la superficie características superhidrofóbicas, haciendo que el ángulo de contacto de las gotas de agua sea mayor de 150° facilitando así que las gotas de agua rueden sobre las hojas arrastrando cualquier partícula de suciedad.



Figura 3. Efecto autolimpiable de la hoja de loto (*Nelumbo nucifera*)

**Modificación de la radiación PAR: filmes luminiscentes.** Los llamados filmes fluorescentes modifican la calidad de la luz solar, en cuanto a su distribución espectral, en la parte ultravioleta y visible del espectro, absorbiendo longitudes de onda poco útiles para la planta (ultravioleta y verde) y emitiéndola en otras más aprovechables para la fotosíntesis (azul y roja) con lo que se conseguirían aumentos de producción y mejora de la calidad de la cosecha. Hasta ahora se ha observado que los efectos de este tipo de cubiertas no son universales sobre todos los cultivos, sino que tanto la producción, como la morfología de los cultivos (longitud de tallo, número de flores, etc.) dependen del tipo de cultivo, incluso de la variedad cultivada. Por tanto, será necesario más trabajo de desarrollo y adaptación de las características de emisión de estas cubiertas a cultivos y zonas específicos.

La luz solar con longitudes de onda entre 400 y 700 nm es necesaria para la fotosíntesis y también actúa como portadora de información sobre las condiciones ambientales del entorno. Los fotorreceptores (fitocromo, fotorreceptores UV-azules...) de la planta detectan cambios en la composición de la luz y la planta reacciona a éstos cambios con una respuesta fotomorfogénica. La fotomorfogénesis es el proceso que determina la forma, el color y la floración de plantas. Las longitudes de onda entre 300 y 800 nm, y especialmente la relación 600-700/700-800 nm, es decir el cociente rojo/rojo lejano o R/FR) son importantes para este proceso. Se ha invertido mucho esfuerzo en desarrollar nuevas cubiertas para invernadero con las propiedades ópticas adecuadas para optimizar el crecimiento vegetal y el desarrollo. Los nuevos plásticos agrícolas que contienen pigmentos fluorescentes pueden convertir la radiación ultravioleta en luz azul o roja (películas descoloridas) o radiación verde en luz roja (películas coloreadas naranja-rojas). Los parámetros más importantes para este tipo de filmes son la transmisión de luz total, la distribución espectral, el efecto fluorescente y su fotoestabilidad. Existen filmes fluorescentes comerciales en el mercado pero su precio y los efectos morfogenéticos positivos o negativos dependiendo de la cosecha han limitado su uso.

**Transmisión de luz y condensación de agua: los filmes antigoteo.** Los filmes antigoteo están modificados superficialmente para aumentar su higroscopicidad (capacidad de absorber humedad) de forma que, al condensar el agua sobre ellos, lo haga en forma de lámina continua transparente y no de gotas aisladas. Aumentan la transmisión de luz visible hasta en un 30%, por lo que su efecto es en general positivo para el cultivo, reducen las enfermedades criptogámicas al reducir el goteo sobre las plantas y favorecen el bloqueo de la radiación infrarroja por lo que ayudan a reducir las pérdidas de calor nocturnas.

Para obtener filmes antigoteo basados en poliolefinas se utilizan surfactantes como ésteres de ácidos grasos y derivados del sorbitol o de la glicerina. El principal inconveniente de este tipo de materiales de cubierta es que el efecto antigoteo puede desaparecer al cabo de un tiempo debido a la extracción de estos surfactantes por el agua condensada, aunque en la actualidad ya existen en el mercado filmes plásticos cuya duración del efecto antigoteo es al menos la de la vida útil del propio material.

El uso de cubiertas antigoteo puede en ocasiones no estar recomendado, como en el caso de la estructura tipo parral, ya que la presencia de la malla de alambre interna, al estar en contacto con el plástico, provoca que por dichos alambres gotee el agua. Así, es fácil observar en invernaderos tipo parral con plásticos antigoteo cómo los cultivos se mojan más que en uno sin antigoteo. Este efecto es recomendable en estructuras de arco, donde los elementos en contacto con la cubierta son escasos.

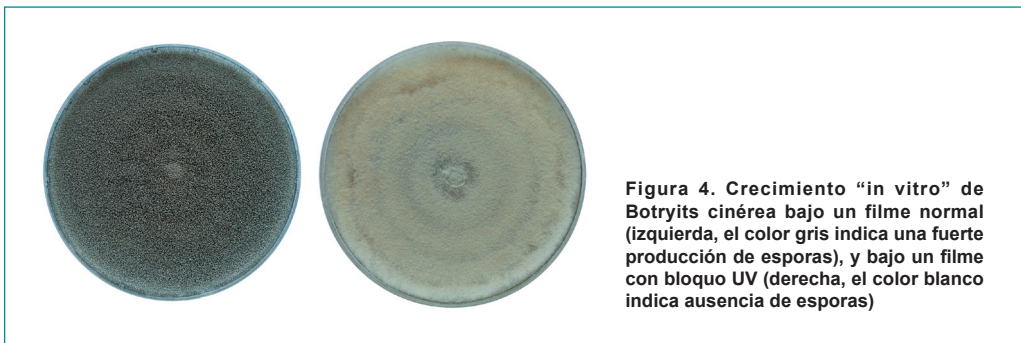
**La radiación UV: filmes antiplagas.** Existen filmes especialmente opacos a la radiación ultravioleta que reducen la incidencia de algunas plagas: son los llamados filmes antiplagas, antibotritis, antibemisia.... En algunos casos se han reportado efectos adversos de estos materiales sobre los insectos polinizadores (abejorros y abejas), pero aun en estos casos puntuales, estos efectos son evitables con un correcto manejo de las colmenas y las ventajas por la reducción de plagas los compensan con creces.

Este tipo de filmes fotoselectivos basan su modo de acción en el bloqueo de la transmisión de radiación ultravioleta (290-380 nm) al interior del invernadero. Este proceso dificulta, ralentiza o disminuye el desarrollo de plagas o enfermedades causadas por hongos o por virus transmitidos por insectos que por algún motivo sean sensibles a la disminución o ausencia de este tipo de radiación. Los efectos sobre estos dos tipos de fitopatógenos son claramente diferenciables:

- Por un lado existen hongos fotosensibles que necesitan luz ultravioleta para producir esporas y reproducirse. El ejemplo más conocido es *Botrytis cinerea*, aunque existen otros como *Fusarium oxysporum*, etc. Los filmes fotoselectivos eliminan esta radiación de la luz ambiente del invernadero, con lo que impiden la reproducción de estos hongos y disminuyen las posibilidades de una plaga.



- Por otro lado, muchos virus causantes de enfermedades en los cultivos protegidos son transmitidos por insectos. Un ejemplo típico en los cultivos de tomate del sur de España es el virus de la cuchara (*Tomato Yellow Curl Leaf Virus*, TYCLV) que es transmitido por *Bemisia tabaci* (mosca blanca). Otro es el que afecta especialmente a los cultivos de pimiento, denominado virus del bronceado (*Tomato Spotted Wilt Tospovirus*, TSWV) del que es vector *Frankliniella occidentalis* (trips). Muchos de estos insectos tienen fotorreceptores sensibles al ultravioleta en sus órganos visuales. Un ambiente oscurecido en esas longitudes de onda no les resulta atractivo por lo que, o bien no entran al invernadero, o bien su movilidad se ve reducida, lo que provoca que su capacidad para causar virosis en los cultivos disminuya sensiblemente.



Las poliolefinas son por sí mismas transparentes a las longitudes de onda de interés para esta aplicación (300-350 nm). Sin embargo el bloqueo de la radiación ultravioleta no es tecnológicamente difícil, aunque también es conocida la tendencia de los absorbentes ultravioleta orgánicos a desaparecer con el tiempo, debido a la migración, dada su escasa compatibilidad con la matriz polimérica. En general, las películas comerciales habituales presentan una cierta opacidad inicial al ultravioleta (5 % de transmisión suele ser un valor habitual) que se pierde con el uso y desaparece prácticamente al cabo de un año de exposición en campo. En la actualidad es posible encontrar en el mercado filmes fotoselectivos que mantienen su opacidad ultravioleta por debajo del valor que se considera efectivo desde el punto de vista antiplagas, a lo largo de dos o tres campañas agrícolas (García *et al.*, 2004).

## 4. Los materiales de cubierta y la temperatura

**La temperatura diurna y la radiación NIR.** Junto con la estructura y otras formas de refrigeración, la correcta elección del material de cubierta puede ayudar a controlar las temperaturas diurnas excesivas en el invernadero en las zonas tropicales o desérticas que pueden sufrir problemas originados por este fenómeno prácticamente a lo largo de todo su ciclo productivo. Los filmes antitérmicos o *cool films* son filmes fotoselectivos que bloquean, en este caso, la radiación infrarroja cercana al visible del espectro solar, evitando el sobrecalentamiento diurno del invernadero y permitiendo cultivos en zonas tropicales o desérticas o en épocas calurosas en otras zonas, donde eran antieconómicos con otras tecnologías.

El espectro de la transmisión de un filme plástico se puede modificar en la zona del NIR usando materiales reflectantes (pigmentos metálicos), materiales absorbedores y pigmentos de interferencia (pigmentos que consisten en micas cubiertas con una capa delgada de óxidos metálicos). Hasta ahora las bajas prestaciones de estos materiales y su alto precio han limitado su uso pero gracias a mucho trabajo de investigación, se ha desarrollado una nueva generación de “filmes antitérmicos” con un buen balance coste/prestaciones (López-Marín *et al.*, 2008).

**La temperatura nocturna y la radiación MIR.** El mantenimiento de una temperatura nocturna mínima que garantice la viabilidad y el crecimiento del cultivo es un objetivo de los agricultores tanto en climas fríos como en climas mediterráneos con inviernos frescos. En el primer caso, los invernaderos suelen ser calefactados y en el segundo pasivos, pero en ambos casos las propiedades del material de cubierta pueden contribuir a controlar el clima del invernadero.

Los filmes térmicos son materiales que absorben o reflejan la radiación infrarroja media (2.500-50.000 nm), especialmente la “ventana atmosférica” (7.000-14.000 nm). Al impedir que la radiación emitida por el suelo durante la noche salga del invernadero, contribuye a mantener la temperatura de las plantas. Para fabricar filmes térmicos basados en poliolefinas, se les añaden cargas minerales (sílice, silicatos o boratos) o se aumenta el porcentaje de acetato de vinilo.

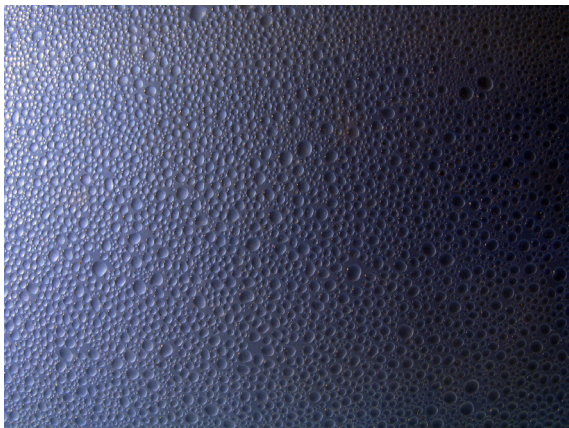
Presentan una opacidad excepcional a la parte infrarroja del espectro de emisión de la Tierra, manteniendo la temperatura del invernadero durante la noche y permitiendo ahorros importantes (10-30 %) en el uso de la calefacción. Permiten, por tanto, cultivos en zonas frías, donde con otros materiales de cubierta no serían rentables, y su uso es previsible que se vaya incrementando a medida que sus características vayan siendo conocidas por los agricultores y que se extienda el uso de la calefacción en los invernaderos españoles.

A través de los años, las cargas minerales utilizadas para aumentar la termicidad, los filmes de polietileno de baja densidad (LDPE) y los copolímeros de etileno y acetato de vinilo/acrilato de butilo (EVA/EBA) han ido evolucionando. Las primeras patentes y los primeros filmes comerciales, a comienzos de los años 70, utilizaron principalmente la sílice, los silicatos y silicatos alúmina hidratada. Con el tiempo, las temperaturas de extrusión usadas por los transformadores aumentaron, y se abandonó el uso del hidróxido de aluminio puesto que se descompone por encima de 180 °C. Durante los años 90 las cargas más utilizadas fueron silicatos, especialmente caolín calcinado. El caolín calcinado tiene algunas limitaciones importantes: acelera la fotodegradación del filme, aumenta moderadamente la turbidez y disminuye la transmisión de luz. Recientemente ha sido desarrollada una nueva familia de cargas minerales que no son degradantes, no disminuyen la transmisión de luz y confieren baja o muy alta turbidez al filme, según el requerimiento. Ahora que la cantidad de carga no es un factor limitante, se pueden alcanzar niveles mayores de eficacia bloqueando la radiación infrarroja, dando lugar a una nueva generación de las películas ultratérmicas (UT), (Espí *et al.*, 2005).

## 5. Los materiales de cubierta y la humedad

Los materiales con propiedades antigoteo, además del efecto positivo sobre la transmisión de luz que ya se ha comentado, tienen efectos sobre otras propiedades que afectan al clima del invernadero. Así, un filme antigoteo cubierto de condensación tiene una menor transmisión infrarroja por lo que ayuda a reducir las pérdidas de calor durante la noche. La forma de condensación también afecta a la humedad dentro del invernadero y a la condensación o goteo sobre el cultivo aunque es difícil generalizar estos efectos ya que dependen mucho de la interacción entre el material y la estructura.

Así, un buen filme antigoteo montado correctamente sobre una estructura en arco ayuda a mantener la humedad relativa por debajo del punto de condensación sobre las plantas. El mismo filme montado de forma deficiente o sobre una estructura poco adecuada puede favorecer el goteo sobre las mismas. Una cubierta que contenga un surfactante de baja calidad que sea fácilmente extraído por la humedad, puede generar niebla dentro del invernadero al favorecer el surfactante la formación de gotitas de muy pequeño tamaño en el aire. Los actuales filmes con efecto antigoteo de buena calidad ya no presentan estos efectos no deseados.



**Figura 5. Condensación de agua sobre un filme normal (arriba), y sobre uno con efecto antigoteo en su cara interna (debajo)**

## 6. La duración de las cubiertas de invernadero

Todos los efectos positivos que un material de cubierta puede aportar al manejo del invernadero quedan supeditados a que el material mantenga su integridad física durante su tiempo esperado de vida, como se ha mencionado, actualmente entre dos y cuatro campañas agrícolas. De hecho, la duración de la cubierta es la única propiedad que suele estar garantizada y probablemente la que más se ha estudiado y documentado (Espí *et al.*, 2007). A continuación se resumen los factores más importantes que afectan a la duración del material y se dan algunos consejos para alargar en lo posible su vida útil.

### Factores que afectan a la duración de un filme agrícola

#### Factores intrínsecos:

- Polímero base (LDPE, LLDPE, EVA).
- Tipo de filme (mono o multicapa).
- Espesor del filme.
- Estabilización.
- Otros aditivos (cargas, pigmentos, aditivos antigoteo...).

#### Factores externos previos a su utilización:

- Condiciones de fabricación.
- Condiciones de almacenamiento.
- Colocación.

#### Factores externos durante su utilización:

- Estructura del invernadero (material de la estructura, protección de la superficie de contacto, diseño, fijación del filme).
- Condiciones climáticas (radiación, temperatura, viento, lluvia, nieve...).
- Cultivo.
- Agroquímicos.

## Consejos para alargar la vida útil de las cubiertas

### Transporte y almacenamiento:

- No arrastrar las bobinas ni rozar sus bordes.
- Apoyarlas sobre una superficie lisa y sin salientes.
- No colocar sobre las bobinas objetos pesados, duros o punzantes.
- Guardar las bobinas evitando su exposición a la luz solar, calor y humedad. Mejor envolverlas en plástico negro.

### Colocación del plástico sobre la estructura del invernadero:

- No rodar la bobina por el suelo.
- Tener cuidado que los alambres del invernadero (si los hay) no tengan extremos sueltos. Su tensión debe ser la máxima posible.
- Eliminar restos de estructuras, hierros oxidados, puntas o astillas de palo.
- No colocar los plásticos durante las horas de máximo calor para evitar su excesiva dilatación.
- Durante la instalación, se utilizarán tablas apoyadas en la estructura para moverse. En ningún caso, se andará por la superficie del film.
- No tensar excesivamente los plásticos sobre las estructuras. Un estiramiento excesivo puede producir una reducción en el espesor y, como consecuencia, una duración menor.

### Durante el cultivo:

- Desinfección del suelo. En caso de desinfectar el suelo con productos químicos, debe cubrirse éste con un film para evitar que los gases que se desprenden entren en contacto con los plásticos de cubierta y los ataquen.
- Contacto de los cultivos con el film. Los contactos directos de los cultivos con el film de cubierta aceleran la degradación del plástico. Deben evitarse dichos contactos.
- Desinfección de los cultivos. Durante la desinfección de los cultivos, se debe procurar no salpicar al plástico del invernadero con productos químicos. Los plaguicidas químicos son los principales causantes de la degradación de los plásticos.

- Ventilación. El agua, al condensarse dentro del invernadero, extrae sus aditivos y transporta los plaguicidas a la cubierta que, como antes se ha dicho, son agentes que dañan los plásticos. Para evitar estos perjuicios, es necesario ventilar adecuadamente los invernaderos.
- Estructura. Una estructura alta y con buena ventilación cenital permite controlar mejor las condiciones de ventilación antes mencionadas.
- Eliminación de residuos. No quemar dentro del invernadero restos de cosechas. Los gases desprendidos atacan al plástico.
- Calefacción. Para la calefacción de socorro, no debe quemarse ningún producto (neumáticos, sebos, etc.) ni ningún combustible que tenga azufre en su composición.
- Estructura de madera. Para las estructuras de los invernaderos, usar madera curada (sin productos químicos). La madera verde segrega sustancias químicas que pueden extraer o destruir los aditivos de los plásticos. Se debe utilizar una pintura blanca en dispersión acuosa para proteger la cara externa del film en las zonas de contacto con la estructura.
- Estructura metálica. Las estructuras oxidadas o pintadas de color oscuro favorecen la degradación del plástico. Como en el caso anterior, se debe emplear una pintura blanca en dispersión acuosa para proteger la cara externa del film en las zonas de contacto con la estructura.

## 7. Reciclado y valorización de los materiales de cubierta

Al final de su vida útil como materiales de cubierta de invernadero, los materiales plásticos han perdido una parte de las propiedades mecánicas y ópticas iniciales, lo que les invalida para esa aplicación, pero mantienen otra parte que los hace valiosos, bien sea en una segunda vida como material (reciclado) o a través del aprovechamiento de la energía que contienen (valorización)

Desde el punto de vista de la toxicidad, podemos decir que el plástico propiamente dicho no es un contaminante, ya que no afecta de forma negativa al hombre, seres vivos y medio ambiente. El problema radica en que el plástico se abandona en el medio donde, junto a los agentes biológicos externos, puede convertirse en un contaminante.



Se distinguen de forma general dos tipos de reciclado: el mecánico y el químico; y dentro de ambos podemos diferenciar distintas especialidades, como veremos a continuación.

Actualmente la técnica de reciclado de plásticos agrícolas que más se utiliza en España es el reciclaje mecánico. El plástico se puede reutilizar en forma de granza que consiste en la transformación del residuo en nuevo material plástico, con peores propiedades que las que tenía inicialmente, es decir, devolver el material al ciclo de consumo del que partió, aunque para otras aplicaciones con menores requisitos. La reutilización en forma de aglomerado es un reciclado mecánico más básico que el anterior, ya que se limita a un triturado más intensivo del residuo y a un posterior encolado, de manera que el producto final tiene menor calidad (puede contener pequeñas partículas ajenas al plástico) y menor precio. Este aglomerado se destina a la fabricación de contenedores de basura, capazos para la recolección hortofrutícola, maceteros, etc.

El reciclado químico es la descomposición del material plástico mediante procesos termoquímicos en moléculas más pequeñas que tengan interés industrial. Éstas pueden ser, o bien monómeros que pueden utilizarse directamente para producir nuevos polímeros los cuales servirán de materia prima para la industria petroquímica, o bien otras sustancias que pueden ser utilizadas en otro lugar como materiales de partida en procesos de la industria química básica.

Por último, la valorización energética es la combustión controlada con recuperación energética. Se trata de otra opción para el tratamiento de los residuos plásticos agrícolas diferente al reciclaje y es especialmente interesante en aquellos casos en que los plásticos han sufrido degradaciones debido a las radiaciones solares que impiden su reciclaje mecánico. La co-combustión de residuos plásticos en centrales térmicas de carbón pulverizado tiene grandes ventajas, las más destacadas son que el rendimiento es más elevado que el de la incineración en masa, se disminuye el consumo de combustibles fósiles y se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otra parte, el potencial de consumo de combustibles sólidos en este tipo de centrales es muy elevado y las mismas están distribuidas geográficamente en la mayoría de las regiones.

## Referencias bibliográficas

- Castilla, N. (2004): *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Madrid, Mundi-Prensa.
- Castilla, N. y Hernández, J. (2005): "The plastic greenhouse industry of Spain"; *Chronica Horticulturae (ISHS)*, 45(3); pp.15-20.
- Díaz, T.; Espí, E.; Fontecha, A.; Jiménez, J. C.; López, J. y Salmerón, A. (2001): *Los filmes plásticos para la producción agrícola*. Madrid, Mundi-Prensa.
- Espí, E.; Salmerón, A.; Fontecha, A.; García, Y. y Real, A. I. (2005): "New ultrathermic films for greenhouse covers"; *Journal of Plastic Films and Sheeting*, 22(1); pp. 59-68.
- Espí, E.; Salmerón, A.; Fontecha, A.; García, Y. y Real, A. I. (2007): "The effect of different variables on the accelerated and natural weathering of agricultural films"; *Polymer Degradation and Stability*, (92); 2150-2154.
- García, Y.; Espí, E.; Salmerón, A.; Fontecha, A. y González, A. (2004): "Viral diseases control with UV-blocking films in greenhouses of Southern Spain"; *Acta Horticulturae (ISHS)*, (659); pp. 331-335.
- Garnaud, J. C. (2000): "Plasticulture magazine: a milestone for a history of progress in plasticulture"; *Plasticulture*, (119); pp. 30-43.
- López-Marin, J.; González, A.; García, Y.; Espí, E.; Salmerón, A.; Fontecha, A. y Real, A. I. (2008): "Use of cool plastic films for greenhouse covering in Southern Spain"; *Acta Horticulturae (ISHS)*, (801); pp. 181-186.

## GREENHOUSE CLIMATE CONTROL IN MEDITERRANEAN GREENHOUSES

Constantinos Kittas<sup>1</sup>, Nikolaos Katsoulas<sup>1</sup>, Thomas Bartzanas<sup>2</sup>  
University of Thessaly<sup>1</sup> and Inst. of Technology and Management of Agricultural Ecosystems<sup>2</sup>

### SUMMARY

An overview of the good agricultural practices for greenhouse horticulture in the Mediterranean and South East Europe regions is presented and discussed. In these areas, natural ventilation and whitewashing are the most common methods/systems used for greenhouse climate control during summer, since it require less energy, less equipment operation and maintenance and are much cheaper to install than other cooling systems. However, generally these systems are not sufficient for extracting the excess energy during sunny summer days and therefore, other cooling methods such as forced ventilation combined with evaporative cooling (mist or fog system, sprinklers, wet pads), are used. On the other hand, during winter period, heating and dehumidification are necessary for a standard quality production. Optimal greenhouse climate control become more important in the latter part of the twentieth century, when concerns about food safety, environmental pollution stimulated extensive research in the development of Integrated Production and Protection systems aiming at a significant reduction of pesticides use. The prospective and needs for future research and development in greenhouse climate control are presented in the conclusion.

### RESUMEN

*En este artículo presentamos una revisión de buenas prácticas para la horticultura de invernadero en el Mediterráneo y en las regiones del sureste europeo. En las áreas, la ventilación natural y el blanqueo son los métodos más usados para el control durante el verano, dado que requieren menos energía, menos equipamiento para operarlos y mantenerlos y son mucho más baratos que el resto de sistemas de enfriamiento. Sin embargo, no son suficientes para extraer el exceso de calor durante los días soleados de verano y por ello se utilizan otros sistemas de enfriamiento, como la ventilación forzada combinada con enfriamiento por evaporación (nebulizadores, aspersores o wet pads). Por otra parte, durante el invierno, es necesario calentar y deshumidificar para lograr una producción de calidad estándar. La optimización del control de clima en los invernaderos ha ido ganando importancia desde finales del pasado siglo, cuando la preocupación por la seguridad alimentaria y la contaminación ambiental estimularon la investigación sobre sistemas de producción y protección que redujeran significativamente el uso de pesticidas. En las conclusiones se hace una prospectiva sobre la investigación y el desarrollando de nuevas fórmulas de control de clima haciendo hincapié en la combinación de estudios físicos y ecofisiológicos.*

<sup>1</sup> University of Thessaly, School of Agricultural Sciences, Dept. of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, Fytokou St., N. Ionia, GR-38446, Volos, Magnesia, Greece.

<sup>2</sup> Centre for Res. & Technology-Thessaly, Inst. of Technology and Management of Agricultural Ecosystems, Techn. Park of Thessaly, 1st Industrial Area of Volos, 38500 Volos, Greece.

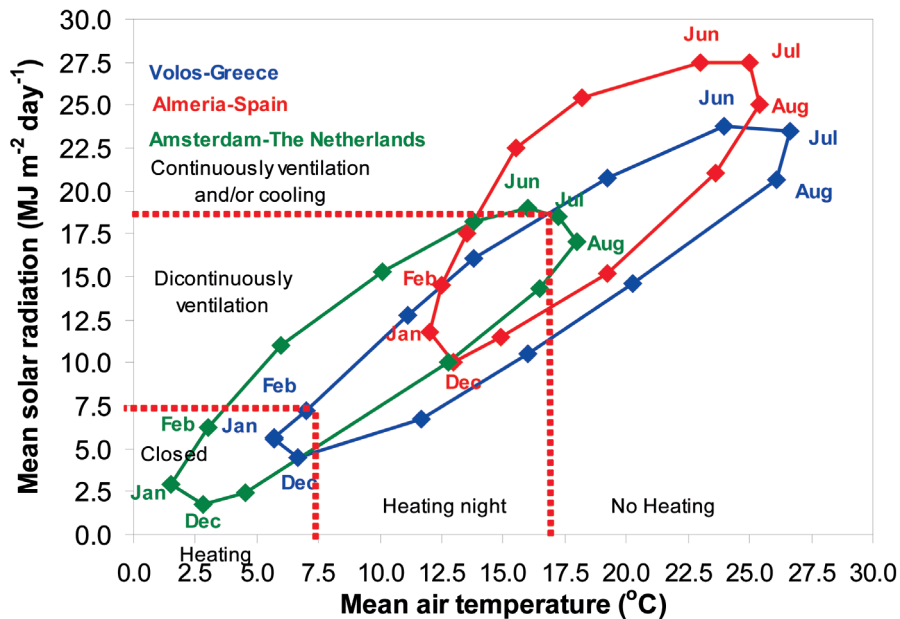
## 1. Driving forces for greenhouse climate control and sustainable energy use in Mediterranean Greenhouse

All greenhouse cultivation systems, regardless of geographic location, consist of fundamental climate control components, and depending on their design and complexity, they can provide a greater or lesser amount of climate control, and subsequent plant growth and productivity.

Temperature is the most important variable of the greenhouse climate that can and needs to be controlled. The majority of plants grown in greenhouses are warm-season species and are adapted to average temperatures in the range 17-27 °C, with approximate lower and upper temperature limits of 10 °C and 35 °C. If the average minimum outside temperature is below 10 °C the greenhouse is likely to require heating, particularly at night. When the average maximum outside temperature is less than 27 °C ventilation will prevent excessive internal temperatures during the day; however, if the average maximum temperature exceeds 27-28 °C then artificial cooling may be necessary. The maximum greenhouse temperature should not exceed 30-35 °C for prolonged periods. The climograph of some Mediterranean and North Europe regions is shown in Figura 1. This shows that in temperate climates e.g. in the Netherlands, heating and ventilation enables the temperature to be controlled over the whole year, however, at lower latitudes, e.g. Almeria-Spain and Volos-Greece, the daytime temperatures are too high for ventilation to provide sufficient cooling during the summer. The attainment of suitable temperatures then requires cooling.

The second important variable of the greenhouse climate is humidity, which has traditionally been expressed in terms of relative humidity. Relative humidity within the range 60-90 % is suitable to plant growth. Values below 60 % may occur during ventilation in arid climates, or when plants are young with small leaves, and this can cause water stress. Serious problems can occur if the relative humidity exceeds 95 % for long periods, particularly at night as this favours the rapid development of fungus diseases e.g. *Botrytis cinerea*. Maintaining the VPD above some minimum value helps to ensure adequate transpiration and also reduces disease problems. During the day, humidity can usually be reduced using ventilation. However, at night, unless the greenhouse is heated, the internal and external temperatures may be similar and if the external humidity is high; reducing the greenhouse humidity is not easy.

**Figure 1. The mean solar radiation vs. mean air temperature for several locations around Europe: The climograph. Dotted lines indicate border lines for different control action in the greenhouse**



After the first “energy crisis” in the early 1980<sup>ies</sup>, where the limited supply of energy caused the first significant increase in energy prices, the energy use of greenhouses has become a major economic and research issue. There are mainly two ways to increase the energy efficiency: a) reduction of the energy input into the greenhouse system and b) increase the production per unit energy. The major challenge is to find ways which meet both needs: improved energy efficiency combined with an absolute reduction of the overall energy consumption and related CO<sub>2</sub> emission of the greenhouse industry. Technological innovations must focus on the energy consumption for the return on productivity, quality and societal satisfaction.

Clearly there are numerous technologies for greenhouse systems which can be adopted by the growers enabling a better and more efficient climate control and energy use. However, many obstacles and constraints remain to be solved. The existing technology and know-how developed in Northern Europe countries are generally not directly transferable to the Mediterranean growers: high-level technology is out of reach for most

of the Mediterranean growers because their cost is too high compared to the modest investment capacity of these growers. Know-how from Northern Europe growers is often inappropriate to the problems encountered in the Mediterranean shelters (Figure 2).

The issues that are addressed in this paper concern the means and best practices by which Mediterranean growers can alleviate the climate-generated stress conditions that inhibit the growth and the development of the crops during the long extending warm season in a sustainable and energy friendly way.



Figure 2. Internal view of a (a) Perral (mainly found in Almeria, Spain) and Venlo (mainly found in The Netherlands) type greenhouse

## 2. Climate Control

### 2.1. Ventilation Cooling and Shading

Getting rid of the heat load is the major concern for greenhouse climate management in hot climate conditions. This can be realised by: (1) reducing incoming solar radiation; (2) removing the extra heat through air exchange; and (3) increasing the fraction of energy partitioned into latent heat.

Shade screens and whitewash are the major existing methods used to reduce the income of solar radiation; greenhouse ventilation is an effective way to remove the extra heat through air exchange between inside and outside, when outside air temperature is lower; and evaporative cooling is the common technique to reduce sensible heat load by increasing the latent heat fraction of dissipated energy. Other cooling technological solutions are available (heat pump, heat exchangers), but are not yet widely used, especially in the Mediterranean countries, because investment cost is yet very high.

### 2.1.1. Ventilation

One of the simplest and more effective ways to reduce the difference between inside and outside air temperature is to improve ventilation. If the greenhouse is equipped with ventilation openings (Figure 3), both near the ground and at the roof, then this type of ventilation replaces the internal hot air by external cooler one during the hot sunny days with weak wind. The external cool air enters the greenhouse through the lower side openings while the hot internal air exits through the roof openings due to density difference between air masses of different temperature causing the lowering of temperature in the greenhouse.

**Figure 3. Greenhouses with different type of ventilation openings**





Sufficient ventilation is very important for optimal plant growth, especially in the case of high outside temperature and solar radiation, which are common conditions during summer in Mediterranean countries. In order to study the variables, determining the greenhouse air temperature and to decide about the necessary measures for greenhouse air temperature control, a simplified version of the greenhouse energy balance is formulated. According to Kittas *et al.* (2005), the greenhouse energy balance can be simplified to:

$$V_a = \frac{0.0003\tau R_{s,o-\max}}{\Delta T} \quad (1)$$

where:

$V_a$  is the ratio  $Q/A_g$ ,  $Q$  is the ventilation flow rate, in  $\text{m}^3 [\text{air}] \text{s}^{-1}$  and  $A_g$  is the greenhouse ground surface area, in  $\text{m}^2$

$\tau$  is the greenhouse transmission coefficient to solar radiation

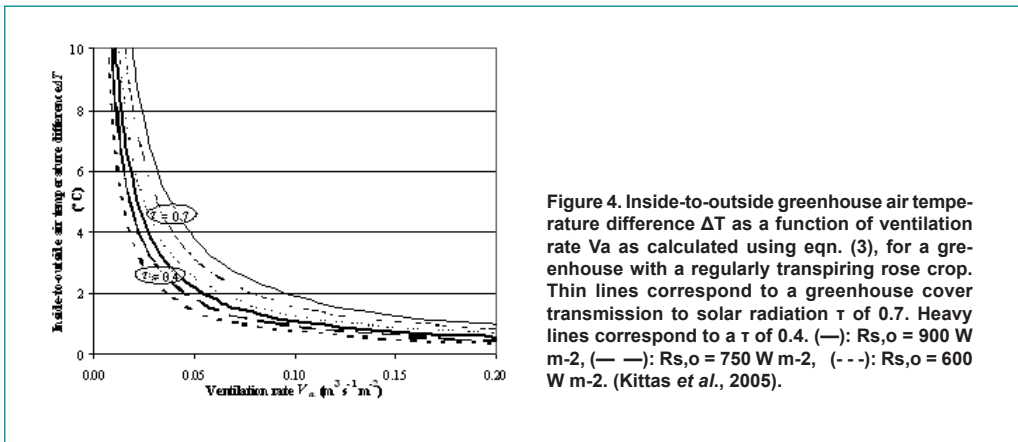
$R_{s,o-\max}$  is the maximum outside solar radiation  $\text{W m}^{-2}$ ,

$\Delta T$  is the temperature difference between greenhouse and outside air, in  $^{\circ}\text{C}$ .

Using eqn. (1), it is easy to calculate the ventilation needs for several values of  $R_{s,o-\max}$  and  $\Delta T$ . Figure 2.2 presents the variation of  $V_a$  for several values of  $R_{s,o-\max}$ ,  $\tau$  and  $\Delta T$ .

From Figure 4 it can be seen that for the area of Magnesia, Greece, where during the critical summer period, values of outside solar radiation exceed the value of  $900 \text{ W m}^{-2}$  (Kittas *et al.*, 2005), a ventilation rate of about  $0.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  (which corresponds, for a greenhouse with a mean height of 3 m, to an air-exchange of  $60 \text{ h}^{-1}$ ) is needed in order to maintain a  $\Delta T$  of about  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

The necessary ventilation rate can be obtained by natural or by forced ventilation. For effective ventilation, ventilators should, if possible, be located at the ridge, on the side walls and the gable. Total ventilator area equivalent to 15-30 % of floor area was recommended by White and Aldrich (1975). Above 30 %, the effect of additional ventilation area on the temperature difference was very small.



Systems like exhaust fan; blower, etc. can supply high air exchange rates whenever needed. These are simple and robust systems and significantly increase the air transfer rate from the greenhouse and allow maintaining inside temperature to a level slightly higher than the outside temperature by increasing the number of air changes. The principle of forced ventilation is to create an air flow through the house. Fans suck air out on the one side, and openings on the other side let air in. Forced ventilation by fans is the most effective way to ventilate a greenhouse, but consumes electricity. It is estimated that the annual needs for electrical energy for greenhouse ventilation in the Mediterranean is about 100.000 kWh per greenhouse ha.

Some key elements are: Ventilation fans should develop a capacity of about 30 Pa static pressure (3 mm on a water gauge), should be located on the leeward side or the lee end of the greenhouse and the distance between two fans should not exceed 8-10 m. Furthermore, an inlet opening on the opposite side of a fan should be at least 1,25 times the fan area. The velocity of the incoming air must not be too high, in the plant area; the air speed should not exceed  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ . The openings must close automatically when the fans are not in operation.

Many researchers also studied the effects of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate. However, the obstruction offered by fine mesh screens to flow through the openings results in air velocity reduction and higher temperature and humidity as well as an increase of the thermal gradients within the greenhouse (Katsoulas *et al.*, 2006).

## Guidelines

- For effective ventilation, ventilators should, if possible, be located at the ridge, on the side walls and the gable.
- Total ventilator area equivalent to 15-30 % of floor area is recommended for natural ventilation. Above 30 %, the effect of additional ventilation area on the temperature difference is very small.
- When not limited by too low external wind speed, natural ventilation may be more appropriate as it creates a more humid and cooler environment, although less homogeneous, around the canopy.
- With roof ventilators, the highest ventilation rates per unit ventilator area are obtained when flap ventilators faced the wind (100 %), followed by flap ventilators facing away from the wind (67 %). The lowest rates of roof ventilation are obtained with the rolling ventilators (28 %).
- Forced ventilation by fans is the most effective way to ventilate a greenhouse, but it consumes electricity.
- Ventilation fans should develop a capacity of about 30 Pa static pressure, should be located on the leeward side or the lee end of the greenhouse and the distance between two fans should not exceed 8-10 m. Furthermore, an inlet opening on the opposite side of a fan should be at least 1,25 times the fan area. The velocity of the incoming air must not be too high, in the plant area; the air speed should not exceed 0,5 m s<sup>-1</sup>. The openings must close automatically when the fans are not in operation.
- With fan cooling alone (no evaporative cooling) little advantage could be derived from increasing airflow rates beyond 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

### 2.1.2. Shading

The entry of unwanted radiation can be controlled by the use of shading or reflection techniques. Shading can be obtained by various methods such as by the use of paints, external shade cloths, use of nets (of various colors), partially reflective shade screens (Figures 2.3) and water film over the roof and liquid foams between the greenhouse walls. Shading is the ultimate solution to be used for cooling greenhouses, because it affects the productivity. However, in some cases, a better quality can be obtained from shading. One of the most used methods adopted by growers due its low cost is white painting, or whitening, the cover material. The use of screens has progressively been accepted by growers and has gained, through the last decade, a renewed interest as shown by the increasing area of field crops cultivated under screenhouses (Cohen *et al.* 2005), while roof whitening, due to its low cost, is a current practice in the Mediterranean Basin.

Baille *et al.* (2001) reported that whitening applied onto a glass material enhanced slightly the PAR proportion of the incoming solar irradiance, thus reducing the solar infrared fraction entering the greenhouse. This characteristic of whitening could represent an advantage with respect to other shading devices, especially in warm countries with high radiation load during summer. Another advantage of whitening is that it does not affect the greenhouse ventilation, while internal shading nets.

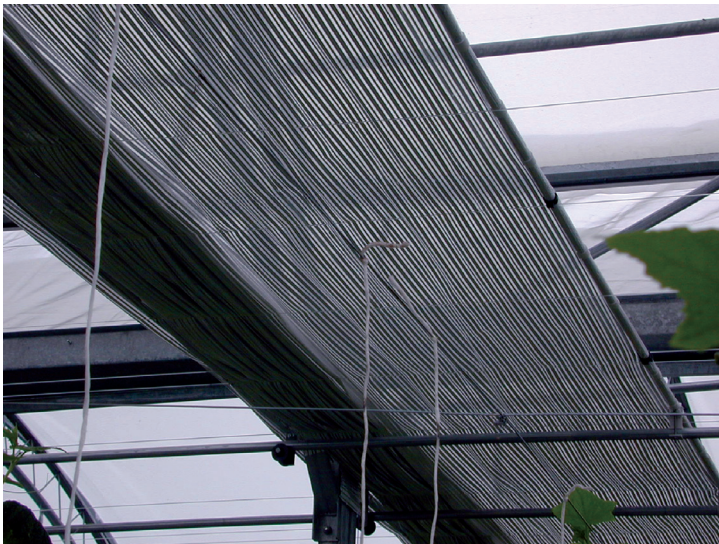


Figure 5. Thermal screen used for energy saving and greenhouse shading

### 2.1.3. Evaporative cooling

One of the most efficient solutions for alleviating the climatic conditions is to use evaporative cooling systems, based on the conversion of sensible heat into latent heat by means of evaporation of water supplied directly into the greenhouse atmosphere (mist or fog system, sprinklers) or through evaporative pads (wet pads). Fog system is based on spraying the water as small droplets with high pressure into the air above the plants in order to increase the water surface in contact with the air (Figures 2.4a). Free fall velocity of these droplets is slow and the air streams inside the greenhouse easily carry the drops. This can result in high efficiency of water evaporation combined with keeping the foliage dry. The fan-and-pad cooling system (Figures 2.4b) is most commonly used in horticulture. Air from outside is blown through pads with as large a surface as possible. The pads are kept permanently wet by sprinkling. The water from the pads evaporates and cools the air. For this reason, the outside air humidity must be low.. In order to achieve an optimal cooling the greenhouse should be shaded. The water flow rate, water distribution system, pump capacity, recirculation rate and output rate of the fan-and-pad cooling system must be carefully calculated and designed to provide a sufficient wetting of the pad and to avoid deposition of dissolved material in it. The advantage of fog systems over wet pad systems is the uniformity of conditions throughout the greenhouse, therefore eliminating the need for forced ventilation and airtight enclosure.

#### Guidelines

- Fog systems can be high (40 bars) or low (5 bars) pressure systems. High pressure systems produce droplets of 10-30  $\mu\text{m}$  while low pressure systems produce droplets with diameter higher than 200  $\mu\text{m}$ . High pressure systems are more effective than low pressure.
- The nozzles of the fog system should be located at the highest possible position inside the greenhouse to allow water evaporation before the water drops to crop or the ground.
- During the operation of the fog system a vent opening of 20 % of the maximum aperture should be maintained.

- The pad material should have high surface, good wetting properties and high cooling efficiency. A suggested pad thickness is 200 mm. It is very important that there are no leaks in the pad where the air can pass through without making contact with the pad.
- The pad area depends on the air flow rate necessary for the cooling system and the permissible surface velocity over the pad. Average face velocities are  $0,75 - 1,5 \text{ m s}^{-1}$ . The pad area should be about  $1 \text{ m}^2$  per  $20\text{-}30 \text{ m}^2$  greenhouse area. The maximum fan-to-pad distance should be 40 m.
- Fans should be placed on the lee side of the greenhouse. If they are on the windward side, an increase of 10 % in the ventilation rate will be needed. The distance between the fans should not exceed 7,5-10 m, and the fans should not discharge towards the pads of an adjacent greenhouse less than 15 m away.
- When starting the cooling system, the water flow through the pad should be turned on first to prevent the pads from clogging. When stopping the cooling system in the evening, the fan should be turned off before the water flow through the pad.
- A basic air flow rate of  $120\text{-}150 \text{ m}^3$  per  $\text{m}^2$  greenhouse area per hour will permit satisfactory operation of an evaporative cooling system.



**Figure 6. Evaporative cooling systems: (left) fog system, (right) fan and pad cooling system.**

## 2.2. Heating

Greenhouse heating is essential even in countries with temperate climate, like the Mediterranean region, in order to maximize crop production in terms of quantity and quality and thus to increase the overall efficiency of greenhouse. Heating costs not only have a critical influence on the profitability, but in the long term may also determine the survival of the greenhouse industry. Apart from the costs problems associated with high energy consumption, heating is associated with environmental problems through the emission of noxious gases.

### *Heating needs*

There are number of formulations for calculating greenhouse heating needs ( $H_g$ ) (W) among which the simplest is that proposed from ASAE (2000):

$$H_g = U A (T_i - T_o) \quad (2)$$

where,

U = heat loss coefficient ( $W m^{-2} K^{-1}$ ), see table 1

A = exposed greenhouse surface area ( $m^2$ )

$T_i$  = inside air temperature, (K)

$T_o$  = outside air temperature (K)

**Table 1. Total heat loss coefficient U at wind speed of  $n \text{ ms}^{-1}$  (ASAE, 2000)**

Covering materials	U value, $W m^{-2} K^{-1}$
Single glass	6,0-8,8
Double glass, 9mm air space	4,2-5,2
Double acrylic 16mm	4,2-5,0
Single plastic	6,0-8,0
Double plastic	4,2-6,0
Single glass plus energy screen of:	
Single film, non-woven	4,1-4,8
Aluminized single film	3,4-3,9



Note the estimation of greenhouse needs using equation 2 did not take into account the heat loss due to infiltration.

Calculate yours greenhouse heating needs		
Steps	How you can do this	
1. Measure the first three dimensions of the greenhouse	First measure the length, width and height of the structure (till the point that the roof begins).	
2. Measure the ridge of the greenhouse	Measure the distance between the ground and the tip of the greenhouse's roof.	
3. Measure the slope of the greenhouse's roof	The slope is the distance from the tip of the roof to the bottom of the roof	
4. Determine the surface area of the greenhouse's roof slope and two walls	To do this use the formula: $2 \times (H + S) \times L$ Where H=height, S=roof slope and L=length	
5. Determine the surface area of the remaining two walls	To do this, use the formula: $(R + H) \times W$ Where R=ridge, H=height and W=width.	
6. Determine the total surface area of your greenhouse	To do this, add together the results from Step 4 and Step 5.	
7. Calculate the desired temperature different	Determine the best temperature for the interior of the greenhouse. Determine the average coldest temperature for the area surrounding your greenhouse. Determine the difference between the two temperatures	
8. Estimate your overall heat loss coefficient	According to your covering material refer to table 1	
9. Estimate the heating needs of your greenhouse	Multiply the total surface area of the greenhouse (step 6) by the temperature difference (step 7) by the overall heat loss coefficient (step 8)	

**Unit Heaters.** In this systems, warm air is blown from unit heaters that have self-contained fireboxes. Heaters are located throughout the greenhouse, each heating a floor area of 180 to 500 m<sup>2</sup>).



**Central Heating.** Heat is half dissipated through radiation and half through convective transfers. Unlike unit heater systems a portion from the heat from central boiler systems is delivered to the root and crown zone of the crop. This can lead to improved growth of the crop and to a higher level of disease control.



**Wall Pipes coils:** Perimeter-wall heating can partially provide the additional heat required and contribute to a uniform thermal environment in the greenhouse. Both bare and finned pipe applications are common.



---

**Overhead pipes coils:** Heat loss through the roofs and gables is supplied through an overhead coil of pipes that is situated across the entire greenhouse. The overhead coil is not the most desirable source of heat because it is located above the plants



---

**In bed-pipe coils:** By placing the heating pipes near the base of the plants, the roots and crown of the plants are heated better than in the overhead system. Air movement caused by the warmer underbench pipe reduces the humidity around the plant.



---

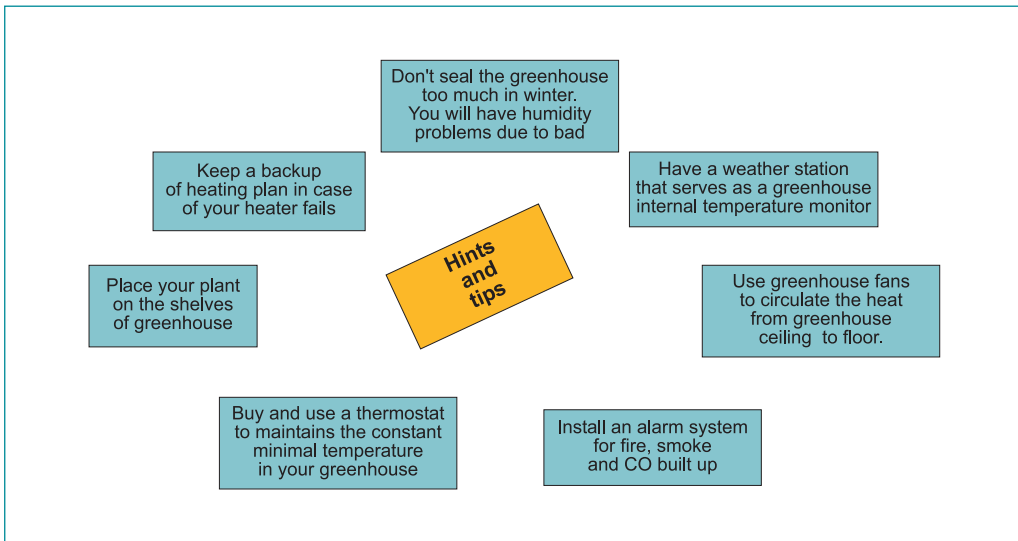
**Pipe/Rail Heating Systems:** maintain uniform temperatures and positively affect the microclimate of plants. Air movement caused by the warmer pipe/rail reduces the humidity around the plant. Such systems are suitable for vegetable production systems.



---

**Heating for antifrost protection:** In these greenhouses heating was used to protect crops from freezing. It is also used to keep air temperature in greenhouse in levels above critical thresholds for condensation control. These greenhouses are not equipped with heavy and complicated heating systems. Usually a unit heater is enough. Other useful recommendations for heating a greenhouse in order to avoid freezing of plants are:

- To back the north wall to an existing structure such as a house or outbuilding. This rear wall offers extra wind protection and insulation.
- Use water to store heat (a simple passive solar heating system). We can use barrels or plastic tubes filled with water, inside the greenhouse to capture the sun's heat. The heat accumulated during the day will be released at night when temperatures drop.
- Insulate your greenhouse. If your greenhouse is constructed of plastic, insulate with a foam sheet. These sheets can easily be placed over the structure at night and removed during the day. Also install an additional layer of plastic to the interior of the green house for added insulation.



### 2.3. CO<sub>2</sub> enrichment

Inside an un-enriched greenhouse, the CO<sub>2</sub> concentration drops below the atmospheric level whenever the CO<sub>2</sub> consumption rate by photosynthesis is greater than the supply rate through the greenhouse vents. The poor efficiency of ventilation systems of the low-cost greenhouses in Mediterranean countries, coupled with the use of insect proof nets (Muñoz *et al.*, 1999) explains the relatively high CO<sub>2</sub> depletion (about 20% or more) reported in southern Spain (Lorenzo *et al.*, 1990). The solution is to increase the ventilation rate through forced air, to improve design and management of the ventilation system, or to provide CO<sub>2</sub> enrichment. The latter is common in the greenhouse industry of Northern Europe as a means to enhance crop photosynthesis under the low radiation conditions that prevail during winter in those regions. Enrichment reportedly increases crop yield and quality under a CO<sub>2</sub> concentration of 700–900 μmol mol<sup>-1</sup> (Nederhoff, 1994). One of the main restrictions is the short time duration available for an efficient use of CO<sub>2</sub> enrichment, due to the need to ventilate for temperature control (Enoch, 1984). The fact that greenhouses have to be ventilated during a large proportion of the daytime makes it uneconomical to maintain a high CO<sub>2</sub> concentration during the daytime. However, some authors advise supplying CO<sub>2</sub> even when ventilation is operating (Nederhoff, 1994) to maintain the same CO<sub>2</sub> concentration in the greenhouse as outside and enriching to levels of about 700–800 μmol mol<sup>-1</sup> during the periods when the greenhouse is kept closed, usually in the early morning and the late afternoon.

Optimal CO<sub>2</sub> enrichment depends on the margin between the increase in crop value and the cost of providing the CO<sub>2</sub> gas. Attempting to establish the optimal concentration by experiment is not feasible because the economic value of enrichment is not constant but varies with solar radiation through photosynthesis rate, and with greenhouse ventilation rate through loss of CO<sub>2</sub> (Bailey & Chalabi, 1994). The optimal CO<sub>2</sub> set point depends on several influences: the effect of CO<sub>2</sub> on the photosynthetic assimilation rate, the partitioning to fruit and to vegetative structure, the distribution of photosynthate in subsequent harvests, and the price of fruit at those harvests, as well as the amount of CO<sub>2</sub> used, greenhouse ventilation rate and the price of CO<sub>2</sub>. Stanghellini *et al.* (2008) applied a simple model for estimating the potential production loss, through data obtained in commercial greenhouses in Almeria Spain and Sicily Italy. They analysed the cost, potential benefits and consequences of bringing more CO<sub>2</sub> in the greenhouse either through increase in ventilation, at the cost of lowering temperature, or through artificial supply. They found that whereas the reduction in production caused by depletion is comparable to the reduction resulting from the lower temperature caused by ventilation to avoid depletion, compensating the effect of depletion is much cheaper than making up the loss by heating. The two principal sources of CO<sub>2</sub> for enrichment are pure gas and the combustion gases from a hydrocarbon fuel such as low sulphur paraffin, propane, butane or natural gas.

## 2.4. Dehumidification

Condensation is a symptom of high humidity and can lead to significant problems, including germination of fungal pathogen spores, including Botrytis and powdery mildew. Condensation occurs when warm, moist air in a greenhouse comes in contact with a cold surface such as glass, fiberglass, plastic or structural members. Condensation can be a major problem and it is unfortunately one which, at least at certain times of the year, is almost impossible to avoid entirely.

## How to dehumidify your greenhouse

### ***Combined used of heating and ventilation systems***

By opening the windows, moist greenhouse air is replaced by relatively dry outside air. This is common practice to dehumidify a greenhouse. This method does not consume any energy when excess heat is available in the greenhouse and ventilation is needed to reduce the greenhouse temperature. Though, when the need for ventilation to reduce the temperature is less than the ventilation needed to remove moisture from the air, dehumidification consumes energy. The warm greenhouse air is replaced by cold dry outside air, lowering the temperature in the greenhouse.

### ***Absorption using a hygroscopic material***

The research on the application of hygroscopic dehumidification in greenhouses is minimal because the installation is too complex and the use of chemicals is not favourable in greenhouses. During the process, moist greenhouse air is in contact with the hygroscopic material releasing the latent heat of vaporisation as water vapour is absorbed. The hygroscopic material has to be regenerated at a higher temperature level. A maximum of 90 % of the energy supplied to the material for regeneration can be returned to the greenhouse air with a sophisticated system involving several heat exchange processes including condensation of the vapour produced in the regeneration process.

### ***Condensation on cold surfaces***

With this system wet humid air is forced to a cold surface which is located inside the greenhouse, different than the covering material. In the cold surface condensation occurs, the condensate water is collected and can be re-used and absolute humidity of the wet greenhouse air is reduced.

One metre of finned pipe used in their study at a temperature of 5 °C can remove 54 g of vapour per hour from air at a temperature of 20 °C and 80 % relative humidity.

### ***Forced ventilation usually with the combined use of a heat exchanger***

Mechanical ventilation is applied to exchange dry outside air with moist greenhouse air, exchanging heat between the two airflows.

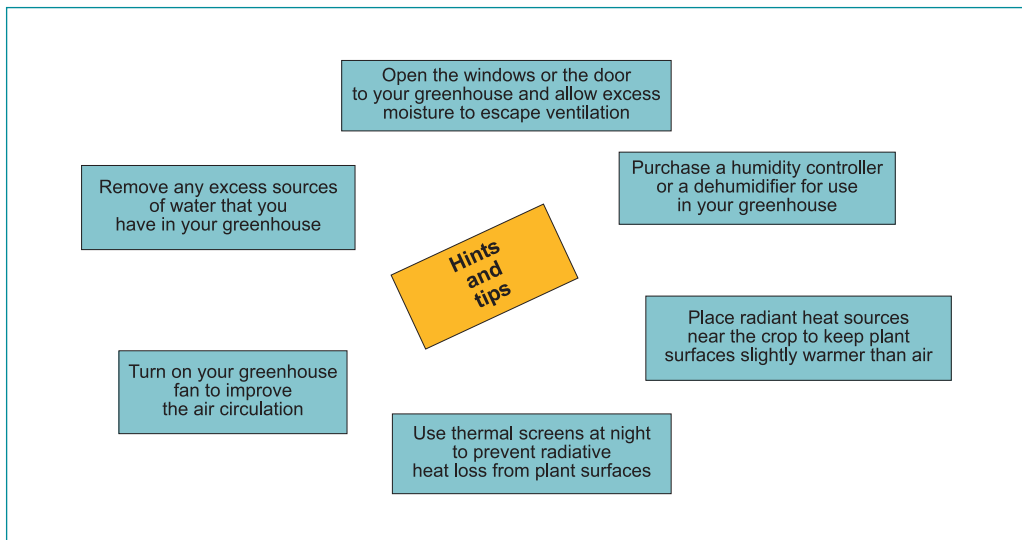
Based on the results of Campen *et al.* (2003) a ventilator capacity of  $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  is sufficient for all crops. The energy needed to operate the ventilators is not considered because the experimental study by Speetjens (2001) showed that the energy consumption by the ventilators is less than 1 % of the energy saved.

### ***Anti-drop covering materials***

The use of anti-drop covering materials is an alternative technology for greenhouse dehumidification. The “anti-dripping” films that contain special additives which eliminate droplets and form instead a continuous thin layer of water running down the sides. The search for anti-drip cover materials has been mainly focused on the optical properties of the cover materials.

### **When to dehumidify?**

<b>Dusk:</b>	Reduce humidity to 70-80 % as night falls to prevent condensation
<b>Dawn:</b>	Reduce humidity to prevent condensation, and jumpstart transpiration as the sun rises



## 3. Rational use of Energy and Renewable Energy Sources

### 3.1. Rational use of energy

The need for rational use of energy is critical since energy forms a substantial fraction of total production costs. For North Western European conditions, with heated greenhouses, the annual energy use for conditioning is very high, e.g. for Scandinavia: 1.900 MJm<sup>-2</sup>. In Mediterranean areas, the energy use for a tomato crop is roughly 50 % of this. However the range of energy consumption in southern regions seems broader (Vésine *et al.*, 2007). In these areas heating is more and more commonly used to obtain early production and a constant quantitative-qualitative yield, leading to a higher energy use. Improved environmental control (e.g. more CO<sub>2</sub> supply, additional lighting), intensified production schemes and use of cooling systems all cause an increase in energy consumption. On average the energy use ranges from 10-30 % of the total production costs, depending on the different regions.

The increase of production per unit of energy (energy efficiency), can be achieved by reduction of the energy use and/or improvement of production. The major challenge in greenhouse operation is to find ways to contribute to improved energy efficiency combined with an absolute reduction of the overall energy consumption. The emission of CO<sub>2</sub> depends on the total use and the type of fossil fuel. E.g. when coal is used, the CO<sub>2</sub> emission is 80-100 kg/MJ; for diesel 75 kg/MJ; for propane 65 kg/MJ, while for natural gas it is about 58 kg/MJ.

In general the same objectives hold for Mediterranean as well as Northern European regions with respect to optimizing the production efficiency: during fall/winter the objective is to maximize the radiation quantity and minimize the energy loss; during the spring/summer the objective is to reduce high temperatures. The rational use of energy (or fossil fuels) can be achieved by three steps:

1. Efficient use of energy (i.e. amount of product per input of energy)
2. Reduction of the energy requirement of the greenhouse
3. Replace fossil fuels by more sustainable sources.



In general these steps require increasing investments, and should therefore be considered as logical steps for the greenhouse operator to follow in order to reduce his energy consumption.

### 3.1.1. Energy efficient climate control

Rational use of energy largely depends on an (energy) efficient greenhouse environmental control which requires knowledge of the physiological processes, like photosynthesis and transpiration, crop growth and development in relation to the various environmental factors temperature, light, humidity and Carbon dioxide. However, for maximal benefit of energy efficient environmental control, it is essential that the greenhouse itself and the control equipment, (heating and ventilation system, CO<sub>2</sub> supply, lighting) are properly designed and frequently checked (at least at the start and once during the growth season). E.g. optimized designs of pipe heating systems may prevent uneven temperature distribution and subsequent loss of energy and crop production.

Although the introduction of new innovative environmental control technologies will add to energy efficiency, large improvements can already be made by simply improving the hardware design like heating and ventilation systems and improving both accuracy and frequently control of the sensor network. Taking this into consideration, the major practical recommendations for rational use of energy largely depend on the operational control by the grower of his available hardware in terms heating, ventilation and cooling systems, screens etc.:

- Take care of regular maintenance, check and calibration of devices, sensors, pumps, valves, ventilators etc. at least at the start of each cropping period.
- Do not place thermostats/ sensors in direct sunlight, use aspirated sensors
- Make as much use as possible of the incoming solar energy under cold conditions by delaying ventilation or the opening of thermal screens
- Use larger differences between day and night temperature settings for ventilation (4-6°C) or use automatic Temperature Integration if available

- Pay attention to the settings of your environmental control system or thermostats and check regular if these still fit with your production strategy
- Consider using higher humidity setpoints during periods with lower irradiation in heated greenhouses
- When using a thermal screen, always open the screen first to reduce humidity rather than the vents.
- When available: apply CO<sub>2</sub> at least to ambient concentration (i.e. 340-370 μmol mol<sup>-1</sup>), this will not reduce the use of energy but significantly contribute to crop growth and production.

### 3.2. Energy saving: Reduction of Energy requirement of the Greenhouse

The major processes of energy loss in natural ventilated greenhouses are: (1) convection and radiation from the greenhouse cover, and (2) thermal and latent heat transfer through ventilation. Improved insulation and reduced ventilation are therefore the first steps to create energy conservative greenhouses. The basics for energy reduction are good maintenance of the greenhouse hardware (doors, cover, side walls, foundation). The practical measures to be taken first of all, deal with preventing unnecessary air leakage form the greenhouse eg by keeping greenhouse doors closed, sealing of air leakages, repair of broken cover material and side walls and uniform closure of natural ventilators.

In almost all regions world wide, and especially at Southern latitudes, there is a large surplus of solar energy requiring efficient cooling systems to reduce the air temperature. Natural ventilation is the most common method of cooling and optimizing the greenhouse geometry can be used to enhance natural ventilation. As greenhouses with series of ventilator openings and/or at different heights perform better with respect to static or wind driven ventilation, traditional horizontal roof greenhouses are being replaced with symmetrical or asymmetrical greenhouses. Windward ventilation is more efficient than leeside ventilation, so new greenhouse constructions have bigger-size openings facing the prevailing winds, requiring adapted mechanical constructions to withstand the stronger wind loads.

Shading to reduce the solar energy flux into the greenhouse during periods with an excessive radiation level is a common way of passive cooling. Mobile shading systems mounted inside or outside have a number of advantages, such as the improvement of temperature and humidity, quality (e.g. reduction of Blossom End Rot in tomato crops) and a clear increase in water use efficiency. Especially for southern regions, movable and external shading are very efficient cooling systems to improve the energy efficiency.

Specific materials which absorb or reflect different wave lengths or contain interference or photo or thermochromic pigments may be used to bring down the heat load but mostly these materials also reduce the PAR level. Materials reflecting part of the sun's energy not necessary for plant growth (the near-infrared radiation, NIR) show promising results (e.g. Garcia-Alonso *et al.*, 2006 and may be applied either as greenhouse cover or as screen material.

Mechanical cooling using fans, heat pumps and heat exchangers can be used to maintain the same greenhouse temperature as with natural ventilation or even further reduce the greenhouse temperature especially under high ambient temperatures and/or high radiation levels. With high cooling capacity it is even possible to keep the greenhouse completely closed, even at maximum radiation levels. However all practical and experimental experience show that return on investment for these systems is poor for all regions in the world, except for the direct evaporative cooling by fogging/misting and indirect evaporative cooling (pad and fan).

This is most likely the result of the positive effect of the lower temperature and higher humidity since increasing humidity in the lower ranges, generally shows positive effects on growth and production, at least with major fruit vegetables. So direct evaporative cooling by misting and pad and fan cooling still give the best economic results and increase the energy efficiency primarily through the impact on production.

The reduction of the energy requirement of the greenhouse is related to the more strategic choices of the grower in relation to his greenhouse construction, cover and environmental equipment in terms of heating system, ventilation, cooling, screens etc. Several recommendations on this equipment have been presented already in Chapter 2.1. Each decision on equipment always should be considered in terms of return on investments. Although each specific situation will lead to different final choices, the more general recommendations for this step from the viewpoint of energy consumption are:

- Take care of regular maintenance of the greenhouse hardware (doors, cover, side walls, foundation, ventilators, pad/fan, screen material etc).
- Keep doors closed, seal of air leakages, replace broken cover material and ripped screens.
- Select a greenhouse cover materials with a low IR transmission.
- Use (moveable) thermal screens for area's with low average and/or night temperatures.
- Replace horizontal roof greenhouses with symmetrical or asymmetrical greenhouses with series of ventilators.
- When using natural ventilation: Build greenhouses with large windward ventilation openings located to the prevailing wind direction.
- If cooling is required: preferably use misting or pad and fan cooling and if not sufficient: add a shading screen.

## References

- American Society for Agricultural Engineers (2000): ANSI/ASAE EP406.3 MAR98, Heating, Venting and Cooling Greenhouses, pp. 675-682.
- Bartzanas, T.; Boulard, T. and Kittas, C. (2002): "Numerical simulation of airflow and temperature patterns in a greenhouse equipped with insect-proof screen"; *Computers and electronics in agriculture*, (3); pp. 207-221.
- Bailey, B. J. and Chalabi, Z. S. (1994): "Improving the cost effectiveness of greenhouse climate control"; *Computers and electronics in agriculture*, (10); pp. 203-214.

- Baille, A.; Kittas, C. and Katsoulas, N. (2001): "Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning"; *Agricultural and Forest Meteorology*, (107); pp. 193-306.
- Campen, J. B.; Bot, G. P. A. and De Zwart, H. F. (2003): "Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes"; *Biosystems Engineering*, 86(4); pp. 487-493
- Cohen, S.; Raveh, E.; Li, Y.; Grava, A. and Goldschmidh, E. E. (2005): "Physiological response of leaves, tree growth and fruit yield of grapefruit trees under reflective shading screens"; *Science Horticulturae*, (107); pp. 15-35.
- Katsoulas, N.; Bartzanas, T.; Boulard, T.; Mermier, M. and Kittas, C. (2006): "Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation"; *Biosystems Engineering*, 93(4); pp. 427-436.
- Kittas, C.; Karamanis, M. and Katsoulas, N. (2005): "Air Temperature Regime in a Forced Ventilated Greenhouse with Rose Crop"; *Energy and Buildings*, 37(8); pp. 807-812.
- Lorenzo, P.; Maroto, C. and Castilla, N. (1990): "CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in Almeria (Spain)". *Acta Horticulturae*, (268); pp.165-169.
- Montero, J. I. (2006): "Evaporative Cooling in Greenhouses: Effects on Microclimate, Water Use Efficiency and Plant Response"; *Acta Horticulturae*, (719); pp. 373-383.
- Munoz, M.; Montero, J. L.; Anton, A. and Giuffrida, F. (1999): "Effect of insect-proof screens and roof openings on greenhouse ventilation". *Journal of Agricultural Engineering Research*, (73); pp. 171-178.
- Nederhoff, E. M. (1994): "Effects of CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops"; *PhD thesis*. Wageningen, The Netherlands, p. 213.
- Speetjens, S. L. (2001): "Warmteterugwinning uit ventilatielucht". *Heat recovery from ventilation*. Report Nota V 2001-86, IMAG, Wageningen, The Netherlands.

- Vésine, E.; Grisey, A.; Pommier, F.; Chantry, N.; Plasenti, J. and Chassériaux, G. (2007): White, J. W. and Aldrich, R. A. (1975): "Progress report on energy conservation for greenhouses research"; *Floriculture Review*, (156); pp. 63-65.
- Stanghellini, C.; Incrocci, L.; Gázquez, J. C. and Dimauro, B. (2008): "Carbon dioxide concentration in mediterranean greenhouses: How much lost production?"; *Acta Horticulturae*, (801); pp. 1.541-1.550.





## USO DEL AGUA DE RIEGO EN LOS CULTIVOS EN INVERNADERO

Fernández, M. D.<sup>(1)</sup>; Thompson, R. B.<sup>(2)</sup>; Bonachela, S.<sup>(2)</sup>; Gallardo, M.<sup>(2)</sup>; Granados, M. R.<sup>(2)</sup>  
Fundación Cajamar<sup>(1)</sup> y Universidad de Almería<sup>(2)</sup>

### RESUMEN

La cuenca Mediterránea alberga una importante superficie de invernaderos. Este rápido crecimiento se debe a que los invernaderos han permitido el desarrollo económico de zonas pobres y un uso más eficiente de los recursos, como la tierra y el agua, este último es un recurso escaso en toda la zona. Conscientes de la importancia que tiene el agua en la sostenibilidad de la horticultura en invernadero en Almería, se ha trabajado desde distintas instituciones por mejorar el uso del agua de riego y reducir los problemas medioambientales relacionados con el riego. En este capítulo, se recogen los principales resultados de estos trabajos de investigación. En primer lugar, hay una caracterización precisa de los sistemas de almacenamiento de agua (balsas de riego) y de las instalaciones de riego, así como de la uniformidad de riego. En segundo lugar, se ha medido el aporte de agua de riego en explotaciones comerciales, y posteriormente se ha analizado el uso del agua mediante indicadores con el objetivo de detectar las ineficiencias e indicar dónde se puede actuar para mejorar el manejo del riego. Paralelamente, se han desarrollado o evaluado herramientas que pueden ayudar a optimizar el uso del agua. Se han evaluado varios tipos de sensores que miden el estado hídrico del suelo y de la planta, y se ha desarrollado una metodología que permite calcular el volumen de riego a partir de datos climáticos. Un problema medioambiental importante y que está relacionado con el riego, es la contaminación de acuíferos por nitratos. Se han caracterizado las prácticas agrícolas que contribuyen a esta contaminación y se han desarrollado herramientas que pueden ayudar a hacer un manejo más óptimo de la fertilización nitrogenada y reducir la lixiviación de nitratos.

### SUMMARY

*In the Mediterranean Basin there is a large area of simple plastic greenhouses. The recent rapid expansion of the greenhouse area has enabled substantial economic development of previously poor regions, and a more efficient use of resources such as land and water, the latter being a scarce resource in this region. Because of the importance of water to the sustainability of the greenhouse-based vegetable production system in Almería, several institutions have worked to improve the use of water for irrigation and to reduce the environmental problems associated with irrigation. In this chapter, the most important results from this research are presented. Firstly, there is a detailed description of the on-farm water storage and drip irrigation systems, such as irrigation uniformity. Secondly, on-farm use of water for irrigation was measured and then analyzed using irrigation performance indicators to detect inefficiencies and to indicate where irrigation water use could be improved. Tools have been developed or evaluated, as to their suitability in this system, to optimize water use. Various sensors to measure soil and plant water status have been evaluated, and a method was developed to calculate the irrigation requirements from climate data. An important environmental problem associated with irrigation is nitrate contamination of groundwater. The practices causing nitrate contamination from this system were characterized and tools have been developed to increase nitrogen use efficiency and reduce nitrate leaching.*

## 1. Introducción

El agua utilizada en la agricultura supone en torno a dos tercios de toda el agua usada en el mundo, porcentaje que suele ser mayor en zonas áridas y semiáridas con fuerte desarrollo agrícola, como el litoral mediterráneo español. En un futuro próximo, la mayor necesidad de alimentos, derivada del esperado aumento de la población mundial y la mejora de su calidad de vida, conducirá a una mayor demanda de agua para regar los cultivos y aumentará la competencia por este cada vez más escaso recurso. En este contexto, hay una creciente demanda social por un uso más productivo y sostenible del agua y por un mejor conocimiento de su uso en la agricultura, el principal usuario.

La provincia de Almería ha padecido durante décadas un fuerte déficit estructural de agua, que ha originado un progresivo agotamiento de los acuíferos de la zona (Sánchez-Martos *et al.*, 1999). La agricultura en invernadero, con unas 27.000 ha que aportan más del 90 % de la producción final vegetal de Almería, es la principal usuaria de agua en la provincia. En este contexto, la estación experimental de la Fundación Cajamar, junto con las universidades de Almería y Córdoba, ha desarrollado desde principios de los años 90 una línea de investigación prioritaria con el objetivo de cuantificar y analizar el uso del agua en los cultivos en invernadero, y generar métodos y herramientas que permitan mejorar su eficiencia y productividad.

## 2. Origen del agua

La mayoría del agua de riego usada en los invernaderos de Almería es de origen subterráneo (80 % de estas explotaciones utilizan agua subterránea, Céspedes *et al.*, 2009), lo que ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos de la zona. En los últimos años, como en otras zonas áridas y semiáridas del mundo, se ha impulsado el uso de fuentes de agua alternativas. El agua depurada reciclada se utiliza, en la actualidad, como fuente primaria de riego en unas 2.000 ha de invernaderos de la Vega de Almería y, en un futuro próximo, está previsto reutilizar gran parte de las aguas depuradas del Campo de Dalías. Sería aconsejable mejorar la calidad de dichas aguas, ya que los tratamientos primarios, secundarios o terciarios que se realizan son, con frecuencia, insuficientes o inadecuados (Bonachela *et al.*, 2007). El agua desalinizada, a pesar de su mayor coste, también se está introduciendo progresivamente en zonas deficitarias

o con aguas de mala calidad del Levante de Almería. El agua de lluvia recogida de las cubiertas de los invernaderos es, en la actualidad, una fuente secundaria de agua en numerosas explotaciones. La extensión de esta práctica a toda la superficie invernada ayudaría a paliar sustancialmente el déficit de agua de riego, ya que la lluvia del litoral de Almería supone casi el 50 % de las necesidades hídricas de las principales rotaciones de cultivo en invernadero (Fernández *et al.*, 2007). La recogida del agua de condensación en los invernaderos puede ser otra fuente alternativa, sobre todo en las zonas más frías. En invernaderos del valle del Almanzora hemos recogido anualmente hasta 40 L m<sup>-2</sup> de agua condensada, aunque en zonas más cálidas (El Ejido) las cantidades recogidas fueron inferiores. Por último, la reutilización de los drenajes de los cultivos en sustrato, práctica generalizada en los invernaderos centroeuropeos, reduciría claramente las necesidades de agua y, sobre todo, reduciría los problemas de contaminación de agua y de suelos en la zona.

### 3. Sistemas de riego y almacenamiento de agua

Los invernaderos de Almería disponen de sistemas de riego que permiten distribuir agua y fertilizantes de forma uniforme (Céspedes *et al.*, 2009). Sin embargo, la uniformidad de la distribución del agua de riego, determinada mediante el coeficiente de uniformidad (Merriam y Keller, 1978), ha sido, generalmente, baja y apenas ha mejorado en las últimas décadas: Orgaz *et al.* (1986) encontraron un coeficiente de uniformidad medio del 76 % en los invernaderos del Campo de Dalías, mientras que, recientemente, Lupiáñez (2009) ha determinado un coeficiente de uniformidad medio del 77 % en la misma zona. Ambos valores están por debajo del mínimo obligatorio (85 %) del reglamento de producción integrada de cultivos hortícolas protegidos de Andalucía (Orden de 10 octubre de 2007, BOJA núm. 211). Teniendo en cuenta que la mayoría de los invernaderos ocupan superficies llanas y que las subunidades de riego suelen ser pequeñas, la uniformidad de distribución del agua de riego debería incrementarse mejorando el manejo y el mantenimiento de los sistemas de riego: regulación y control de presiones en las subunidades, reparación de fugas y limpieza de la red, manejo de balsas y filtros, etc. (Lupiáñez, 2009).

La mayoría de las explotaciones de invernaderos disponen de balsas de riego (83,5 %, Céspedes *et al.*, 2009) para garantizar el suministro hídrico a los cultivos, que son, en general, pequeñas y sin cubrir (21,7 % cubiertas). En la provincia de Almería se han inventariado 8.730 balsas mayores de 150 m<sup>2</sup>, que ocupan unos 6,17 km<sup>2</sup> y que están concentradas en las zonas invernadas (Casas *et al.*, 2011). El ahorro de agua estimado que supondría cubrir todas las balsas con mallas plásticas sería de unos 6,9 hm<sup>3</sup>, considerando una evaporación media anual de 1.404 L m<sup>-2</sup>. Sin embargo, el coste del agua ahorrada cubriendo las balsas sería menor que el coste de cubrirlas en la mayoría de zonas invernadas (Martínez Álvarez *et al.*, 2009). Por otro lado, en zonas con escasos ecosistemas acuáticos naturales, como el litoral de Almería, las balsas de riego abiertas desempeñan una importante función medioambiental de conservación de la biodiversidad (Casas *et al.*, 2011).

#### 4. Aportes de agua de riego

El aporte medio de agua de riego a los principales cultivo hortícolas en suelo (sin incluir el tomate), medidos durante 6 campañas agrícolas consecutivas (1993/94–1998/99) en 41 invernaderos representativos del Campo de Dalías (Fernández *et al.*, 2007), fue de 228 L m<sup>-2</sup> por ciclo de cultivo y osciló entre 158 L m<sup>-2</sup> en la judía verde de otoño-invierno y 363 L m<sup>-2</sup> en el pimiento de otoño-invierno (Tabla 1). En un estudio similar en el Campo de Níjar el aporte medio a un tomate de otoño-primavera fue de 558 L m<sup>-2</sup> (Carreño *et al.*, 2000). Estos valores son claramente inferiores a los aportes a dichos cultivos al aire libre (Fernández *et al.*, 2007), debido, sobre todo, a la menor demanda evaporativa en el invernadero (menor radiación solar y velocidad de viento), en comparación al aire libre (Orgaz *et al.*, 2005), y a que los cultivos hortícolas en invernadero suelen desarrollarse en ciclos centrados en invierno, mientras que al aire libre los ciclos suelen estar centrados en verano (Orgaz *et al.*, 2005).

Los aportes por campaña agrícola son generalmente mayores que por ciclo de cultivo, al ser frecuentes las rotaciones anuales de dos cultivos. Los aportes medios a las principales rotaciones de cultivo en invernadero del Campo de Dalías oscilaron entre 363 (pimiento de otoño-primavera) y 502 L m<sup>-2</sup> (pimiento de otoño-invierno + melón de primavera), con un valor promedio de 444 L m<sup>-2</sup> (Fernández *et al.*, 2007). Los aportes totales anuales suelen ser aún mayores, ya que es común realizar riegos de desinfect-

ción, lavado de sales y mantenimiento del sistema de riego entre campañas agrícolas. Considerando estos riegos suplementarios (Peña, 2009), el valor medio estimado del aporte total anual es de 495 L m<sup>-2</sup> en el campo de Dalías.

#### 4.1. Indicadores del uso del agua de riego

El análisis del uso del agua de riego en la agricultura se realiza mediante una serie de indicadores establecidos internacionalmente (Malano y Burton, 2000) y los más representativos a escala de explotación/parcela son:

- Aporte relativo de agua de riego: cociente entre el agua de riego aportada (L m<sup>-2</sup>) y la requerida para cubrir las necesidades del cultivo (L m<sup>-2</sup>);
- Productividad del agua de riego (€ m<sup>-3</sup>): cociente entre el valor económico generado por el cultivo (€ m<sup>-2</sup>) y el agua de riego aportada (m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>);
- Eficiencia en el uso del agua de riego (kg m<sup>-3</sup>): cociente entre el rendimiento comercial del cultivo (kg m<sup>-2</sup>) y el agua de riego aportada (m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup>).

El valor medio del aporte relativo de agua de riego en los principales cultivos hortícolas del Campo de Dalías fue de 1,13 (Fernández *et al.*, 2007), lo que significa que los agricultores aportaron, de media, un 13 % más de agua de las necesidades de sus cultivos. Se trata de un valor medio aceptable, ya que los agricultores buscan maximizar el rendimiento y la calidad de sus productos. Sin embargo, hubo una elevada variabilidad en cada ciclo de cultivo (altos coeficientes de variación) y entre ciclos (Tabla 1). Así, el aporte relativo medio al pepino fue de 1,63, es decir, este cultivo, de media, fue regado muy excedentariamente. Además, los aportes relativos de agua de riego fueron muy excedentarios durante la fase de establecimiento de todos los cultivos y, en menor medida, durante la de desarrollo de los mismos (Fernández *et al.*, 2007). Este indicador muestra que podemos mejorar el uso de agua en los invernaderos ajustando los aportes a los requerimientos hídricos.

La productividad del agua de riego osciló entre 7,8 y 15,9 € m<sup>-3</sup> (Tabla 1), valores muy superiores a los de otras zonas regables andaluzas y españolas (Lorite *et al.*, 2004), debido a los menores aportes de agua y, sobre todo, a la elevada productividad y valor económico de las hortalizas en invernadero.

La eficiencia media en el uso del agua de riego osciló entre 15,3 y 35,6 kg m<sup>3</sup> (Tabla 1), valores inferiores a los medidos en cultivos en sustratos en invernaderos centroeuropeos. En cambio, estos valores son, en general, mayores que en los mismos cultivos al aire libre, debido a los menores aportes de agua y a la mayor productividad en invernadero (Fernández *et al.*, 2007).

**Tabla 1. Valores medios (coeficiente de variación entre paréntesis) de aportes y aportes relativos de agua de riego (RIS), y la eficiencia en el uso (IWUE) y productividad del agua de riego (WP) en los principales ciclos de cultivo hortícolas en los invernaderos del Campo de Dalías**

Ciclos	Aportes (L m <sup>2</sup> )	RIS			IWUE (kg m <sup>-3</sup> )	WP (€ m <sup>-3</sup> )	
		Ciclo	1	2			3
Pimiento O-I	311 (32)	0,95 (36)	2,78	1,27	0,91	21,0(40)	13,1(50)
Pepino	270 (40)	1,62 (40)	3,53	1,48	1,20	33,2(52)	12,4(59)
Judía O-I	158 (33)	1,18 (24)	4,28	1,06	0,76	15,3(45)	15,9(45)
Melón	177 (31)	1,00 (39)	3,52	1,19	0,52	22,8(34)	10,1(44)
Sandía	189 (38)	0,92 (33)	2,41	1,27	0,42	35,6(34)	7,8 (46)
Judía P	197 (24)	1,03 (28)	4,25	1,80	0,60	16,8(31)	15,4(53)
Pimiento O-P	363 (30)	1,02 (27)	4,85	0,88	0,68	16,9(23)	8,7 (40)

O: Otoño; I: Invierno; P: Primavera.

Se presentan valores del RIS para todo el ciclo de cultivo y para tres periodos a lo largo del mismo: establecimiento del cultivo (1); desarrollo del cultivo (2); y desde mitad hasta final del ciclo (3)

## 5. Programación del riego en invernadero

La programación del riego es un conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir **cuándo** y **cuánto** riego aplicar para cubrir las necesidades de los cultivos, y su importancia se pone de manifiesto cuando el agua es un recurso escaso y su coste es elevado. La programación del riego se puede realizar a partir de medidas del contenido de agua en el suelo, medidas del estado hídrico de la planta o a partir de datos climáticos.

## 5.1. Programación del riego mediante sensores

Los sensores que miden el estado hídrico del suelo y de la planta pueden usarse como base para el manejo del riego o para complementar otros métodos. Estos sensores permiten adaptar el manejo del riego a las características particulares de cada cultivo/finca. Hasta finales de los 80, la mayor parte de estos sensores requerían medidas manuales y su uso en fincas comerciales era muy limitado. El desarrollo tecnológico reciente ha permitido una nueva generación de sensores con nuevas prestaciones. Actualmente la información sobre el estado hídrico del suelo y la planta puede ser enviada directamente a un ordenador personal, teléfonos móviles o controladores de riego y activar el riego. En invernadero, debido a la elevada frecuencia del riego y a la baja demanda evaporativa, el medio de cultivo se mantiene continuamente húmedo. La pequeña superficie de las fincas y la intensividad del manejo de los invernaderos favorecen el uso de las tecnologías de monitorización.

### 5.1.1. Programación del riego con sensores de humedad del suelo

Los sensores de humedad en el suelo miden (i) la humedad volumétrica del suelo ( $\Theta_v$ ) o (ii) el potencial matricial del suelo ( $Y_m$ ). La  $\Theta_v$  es la proporción del volumen de suelo ocupado por agua. El  $Y_m$  indica la disponibilidad de agua para los cultivos (Gallardo y Thompson, 2003a). La  $\Theta_v$  es una medida que necesita interpretación (Thompson y Gallardo, 2003). Los sensores de suelo pueden ser de lectura manual o automática, lo cual permite obtener información más detallada de la dinámica de uso del agua por el cultivo y su movimiento en el suelo. Los sensores de suelo se pueden usar con distintas configuraciones (Thompson y Gallardo, 2003); un sensor debe estar siempre en la zona de máxima concentración de raíces. Se pueden colocar más sensores en profundidades diferentes por ej. debajo de las raíces para controlar drenaje.

El manejo del riego con sensores se basa en mantener la humedad del suelo entre dos límites, uno inferior que indica los valores más secos del suelo cuando se debe iniciar el riego y un límite superior que indica los valores más húmedos que se permiten. La diferencia entre los dos límites es una indicación del volumen de riego requerido (Figura 1).

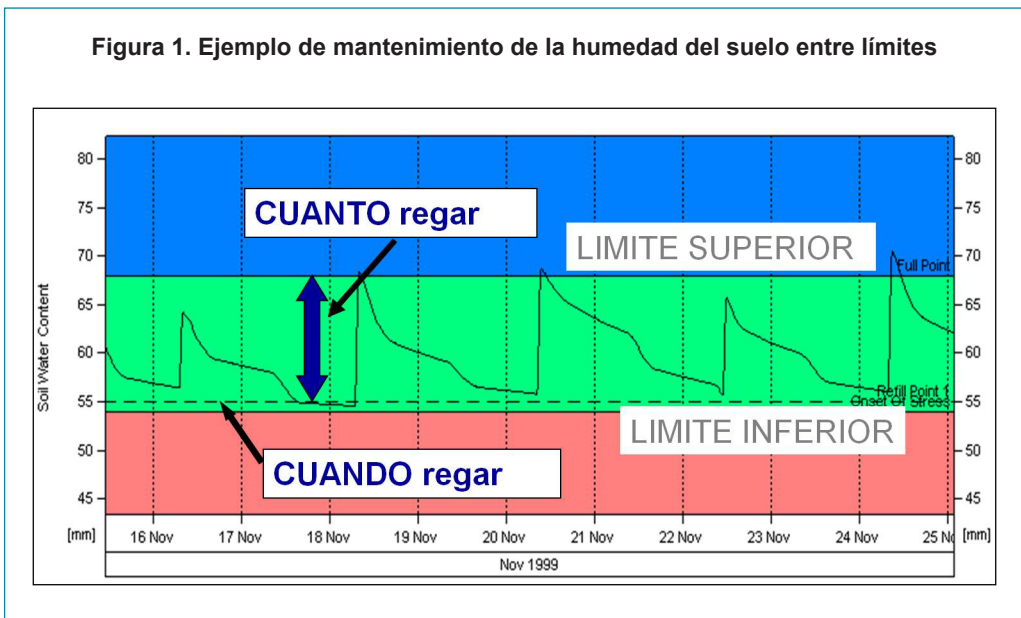


## Sensores que miden el potencial matricial del suelo

En condiciones no salinas, el  $Y_m$  es una buena aproximación al potencial hídrico total del suelo ( $Y_s$ ); el  $Y_m$  mide la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del suelo e indica la disponibilidad de agua del suelo para la planta. En condiciones salinas (en suelos o agua), el potencial osmótico puede contribuir apreciablemente al  $Y_s$ . La contribución de la salinidad a este potencial se maneja en campo de forma independiente. Algunos autores y fabricantes de equipos han indicado los límites superiores e inferiores entre los cuales debe encontrarse el  $Y_m$  en la zona radicular para la producción hortícola en suelo; se establecen diferencias entre la textura, la especie de cultivo y las condiciones evaporativas. En el caso de hortalizas bajo invernadero con riego de alta frecuencia, recomendaciones generales de los intervalos de  $Y_m$  son entre -10 y -20 kPa, -10 y -30 kPa, y -20 y -40 kPa para suelos de textura gruesa, media y fina respectivamente.

Hay dos grupos de sensores de potencial matricial que son relevantes para cultivos hortícolas protegidos: tensiómetros, y sensores de matriz granular. Los tensiómetros son baratos, simples y fáciles de utilizar. Requieren una preparación y mantenimiento adecuado para proporcionar datos exactos y fiables (Thompson y Gallardo, 2003). Hay (i) tensiómetros manuales en los cuales se obtienen datos a partir de la lectura visual

Figura 1. Ejemplo de mantenimiento de la humedad del suelo entre límites



de un vacuómetro, (ii) tensiómetros manuales con un interruptor para activar el equipo de riego cuando se alcance un valor predeterminado, y (iii) tensiómetros eléctricos que tienen transductores de presión que permiten medir continuamente y automáticamente los datos y que pueden actuar como controladores de riego. Los tensiómetros, normalmente tienen un rango de trabajo de 0 a -80 kPa. Este reducido rango es una limitación en algunos sistemas de cultivo, pero generalmente en cultivos hortícolas protegidos el  $Y_m$  se mantiene dentro de esos límites. Hay ciertas excepciones, cuando la demanda evaporativa y la superficie foliar son altas como por ejemplo en cultivo de melón en mayo-junio en el sureste español.

Los sensores de matriz granular son sensores de resistencia eléctrica y están formados por una matriz con dos electrodos. El más común es el Watermark (Irrrometer Co. California, USA). El agua dentro de la matriz se equilibra con la del suelo. La medida de la resistencia eléctrica entre los dos electrodos es una función del potencial matricial del suelo. Son sensores baratos, simples, fáciles de instalar con pocos requisitos de preparación y mantenimiento. El rango de medida es -10 a -200 kPa. El rango es más amplio que el de los tensiómetros pero no son muy fiables en suelos muy húmedos (0 a -10 kPa) y tienen una respuesta lenta en suelos que se secan rápidamente (Thompson *et al.*, 2006). En general son menos exactos que los tensiómetros pero necesitan menos atención por parte del usuario. Las lecturas se toman manualmente con un equipo lector o automáticamente y tienen una vida útil de 5-7 años.

**Figura 2. Un tensiómetro manual e instalado en suelo arenado, un sensor watermarky su lector**



## Sensores que miden el contenido volumétrico del agua en suelo

Del grupo de sensores que miden la humedad volumétrica del suelo ( $\Theta_v$ ) los más adecuados para sistemas de cultivo hortícolas de invernadero son los sensores dieléctricos (Thompson y Gallardo, 2003). Hay dos tipos (i) TDR (en inglés, Time Domain Refractometry) y (ii) de capacitancia, o FDR (en inglés, Frequency Domain Refractometry). Los sensores TDR, compuestos por barras de acero inoxidable de  $>10$  cm, se usan bastante en investigación. Los sensores de capacitancia, además de investigación se usan para el manejo de riego en aplicaciones comerciales. Los sensores de capacitancia se comercializan en varias configuraciones, p. ej. barras o anillos en varias profundidades (Thompson y Gallardo, 2003; Figura 3)

El sensor de capacitancia mas usado para el manejo del riego es el EnviroSCAN (Sentek Technologies, Australia) que consiste en varios sensores tipo anillo montados verticalmente en una sonda a varias profundidades (Figura 3). Este equipo registra datos continuos de humedad dando información detallada sobre la dinámica del agua en el suelo tanto en la zona radicular como por debajo. El EnviroSCAN es relativamente caro y sensible a cambios en salinidad del suelo (Thompson *et al.*, 2007a) lo cual limita su uso en sistemas donde se maneja la salinidad para aumentar la calidad del fruto.

Algunos sensores dieléctricos y tensiómetros se han usado para el manejo del riego en cultivos en sustrato (Thompson y Gallardo, 2003). Estos sensores dieléctricos incluyen el EnviroSCAN (Figura 3), WET sensor (Delta-T Devices, Reino Unido; Figura 3), sensor ECHO (Decagon Devices, EEUU), y sensor Grodan WCM Continuous Sensor (Grodan, Holanda). Los tensiómetros con una escala reducida p. ej. 0 a -40 kPa y respuesta rápida se han usado con sustratos artificiales y medios de cultivo como la arena.

**Figura 3. Sensores de capacitancia. Varios sensores EnviroSCAN dispuestos en una sonda, una sonda EnviroSCAN instalada en suelo, un sensor ECHO y el WET sensor con lector**



### 5.1.2. Programación del riego con sensores de planta

Los sensores de planta que mas aplicaciones tienen para el manejo del riego son: (i) sensores de diámetro de tallo, (ii) sensores de flujo de savia, y (iii) sensores de temperatura de hoja/cubierta (Gallardo y Thompson, 2003b). Los sensores de diámetro de tallo miden la contracción del tallo que ocurre durante el día en respuesta a la transpiración y el crecimiento del tallo; ambos parámetros son muy sensibles al estrés hídrico. En los últimos años ha habido mucha investigación con estos sensores en cultivos leñosos y cierta adopción en fincas comerciales. En cultivos hortícolas, estos sensores pueden ser indicadores de estrés hídrico; sin embargo en cultivos de ciclo corto, la tasa de crecimiento rápida hace mas difícil la interpretación de los datos; además su sensibilidad en la detección de estrés hídrico en cultivos de invernadero decrece en condiciones invernales de baja demanda evaporativa (Gallardo *et al.*, 2006). De manera similar, los sensores de flujo de savia que miden directamente la transpiración de la planta han sido objeto de investigación sobre todo en cultivos leñosos. Estos sensores debido a su elevado coste y complejidad técnica se han usado fundamentalmente en investigación y no existen muchas aplicaciones comerciales en horticultura para el manejo del riego. La diferencia de temperatura entre la hoja o el cultivo y el ambiente es también un indicador sensible al estrés hídrico. Se han propuesto varios indicadores para el riego basados en esta medida como el CWSI (“Crop Water Stress Index”), pero aunque hasta ahora no ha habido aplicaciones comerciales, actualmente se está trabajando en este método en combinación con teledetección. En general los sensores de planta han tenido menos aplicaciones prácticas para el manejo del riego que los sensores de suelo.

### 5.1.3. Consideraciones generales sobre sensores para el manejo de riego

Cuando se usan sensores para el manejo del riego hay que considerar (i) las repeticiones con un mínimo de 2-3 sensores para un cultivo dado y (ii) la localización de los sensores que debe ser representativa del cultivo. Otras consideraciones son el coste, facilidad de uso, preparación, mantenimiento, apoyo técnico, facilidad en la interpretación de datos, disponibilidad de protocolos de riego, idioma de trabajo y disponibilidad de un software amigable en equipos que requieren el uso de un ordenador (Thompson y Gallardo, 2003). En general los sensores de suelo son mas fáciles de usar para el manejo del riego que los de planta y el avance en el desarrollo de protocolos de riego ha

sido mayor. Los sensores de suelo de capacitancia son usados actualmente en fincas comerciales en otros países. Sin embargo dos limitaciones importantes son su coste y su elevada sensibilidad a la salinidad. Los tensiómetros son sensores muy adecuados para cultivos hortícolas de invernadero en suelo porque son simples, baratos y fiables, no están afectados por la salinidad del suelo y su rango de trabajo normalmente no es una limitación en los suelos generalmente húmedos de este tipo de cultivos.

## 5.2. Programación del riego con datos climáticos

La programación del riego con datos climáticos se basa en la utilización expresiones matemáticas que, a partir de datos climáticos, permiten estimar el volumen de agua consumido por el cultivo o evapotranspiración del cultivo (ETc). Cuando se utilizan sistemas de riego por goteo, dada la elevada frecuencia de riegos se suele ignorar el papel del suelo como almacén de agua y se considera que el contenido de agua en el suelo no varía con el tiempo. Por tanto, bajo invernadero la programación del riego se simplifica y el proceso de programación se enfoca hacia cuanta agua hay que aplicar basándose en estimaciones de la ETc.

Los datos climáticos deben proceder de estaciones agrometeorológicas localizadas en áreas cultivadas donde los instrumentos se exponen a condiciones atmosféricas similares a las de los cultivos circundantes (Allen *et al.*, 1998). Además, hay que tener en cuenta que la precisión de las estimaciones del consumo de agua del cultivo no será superior a la de los datos climáticos empleados. Por tanto, antes de realizar estimaciones del consumo de agua del cultivo es muy recomendable que se evalúe la calidad de los datos climáticos para detectar errores. Se han desarrollado varios procedimientos que permiten evaluar la calidad de los datos climáticos de forma sencilla (Meek y Hatfield, 1994; Allen *et al.*, 1998).

### 5.2.1. Modelos para estimar las necesidades de agua de los cultivos

En los invernaderos con sistemas de control climático y cultivo en sustrato se han desarrollado modelos que permiten estimar la transpiración del cultivo a escala horaria o inferior (Stanghellini, 1987; Baille *et al.*, 1994; Medrano *et al.*, 2005). El uso de estos

modelos en invernaderos con bajo nivel tecnológico puede ser complejo porque es necesario disponer de: (i) datos climáticos horarios en tiempo real, (ii) datos referentes al cultivo, tales como la resistencia aerodinámica y el índice de área foliar, de los cuales hay poca información o son de difícil medición y (iii) hay que conocer como varían los parámetros de los modelos con las condiciones climáticas, especie y estado de desarrollo.

En los invernaderos sin control climático y bajo nivel tecnológico, sí además se usa el suelo como medio de cultivo, puede ser más aconsejable el uso de expresiones más sencillas. Se han propuesto relaciones empíricas entre la transpiración del cultivo y la radiación solar (de Villele, 1974) o entre la evapotranspiración del cultivo y la evaporación desde un Tanque Clase A (Castilla, 1986). Sin embargo, estas relaciones varían con las condiciones climáticas, especie cultivada y estado de desarrollo del cultivo, ya que los coeficientes de estas relaciones engloban tanto los efectos del clima y cultivo sobre la demanda de agua del cultivo.

El modelo de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) permite separar los efectos del clima y cultivo sobre el consumo de agua, lo que ha permitido su aplicación en distintas condiciones climáticas o de cultivo. Este modelo estima el consumo de agua del cultivo o evapotranspiración (ETc) (ec. 1) como el producto de la evapotranspiración de un cultivo de gramíneas de referencia (ETo), que cuantifica el efecto que tiene el clima sobre la demanda de agua del cultivo, y el coeficiente de cultivo (Kc), que depende del cultivo en cuestión, su estado de desarrollo y disponibilidad de agua en el suelo, sirve como una integración de las diferencias físicas y fisiológicas entre el cultivo y el cultivo de referencia.

$$ETc = ETo * Kc \quad [1]$$

Este modelo, ampliamente usado en cultivos al aire libre, ha sido calibrado y evaluado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar para su uso en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005; Bonachela *et al.*, 2006; Fernández *et al.*, 2010).

Existen numerosas expresiones que permiten estimar la ETo a partir de datos climáticos, pero el método FAO-56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) se ha recomendado como método estándar de cálculo por su precisión tanto en climas áridos como húmedos. Este método requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Bajo invernadero en clima mediterráneo, este método ha proporcionado buena precisión cuando se utiliza un valor fijo de resistencia aerodinámica de

295 s m<sup>-1</sup> (Fernández *et al.*, 2010). Además, los métodos de Hargreaves y un método de radiación local también proporcionaron estimaciones precisas, y dado los pocos datos climáticos que requieren y su sencillez se recomiendan para su uso en estas condiciones (Fernández *et al.*, 2010). El método de radiación local permite la estimación de los valores de ETo bajo invernadero a partir de valores de radiación solar medida en exterior y de la transmisividad de la cubierta del invernadero, que es función del tipo de estructura, material de cerramiento, edad del plástico, etc. La principal ventaja de este método es la posibilidad de adaptar la dosis de riego a diferentes tipos de manejo (encalado o blanqueo, distintos tipos de sombreo), tipos de estructura de invernaderos y materiales de cerramiento a partir de la transmisividad de la cubierta.

Los valores de Kc de los principales cultivos en invernadero han sido determinados en las condiciones del sudeste de España (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005). También se ha desarrollado un modelo que estima los valores de Kc en función de la temperatura medida dentro de invernadero (Fernández *et al.*, 2001; Orgaz *et al.*, 2005), lo que ofrece un método simple para adaptar las dosis de riego a diferentes condiciones climáticas o fechas de plantación.

Utilizando el modelo de la FAO adaptado a invernadero se desarrolló un software, PrHo v 2.0 (© 2008 Fundación Cajamar; Fernández *et al.*, 2008) y se han elaborado recomendaciones de riego basadas en datos climáticos medios de radiación solar exterior y temperatura de dentro de invernadero de una serie histórica de más de veinte años (Figura 4). El objetivo es proporcionar a técnicos y agricultores herramientas que les permita optimizar los aportes de riego a los cultivos hortícolas bajo invernadero, y que además sean fácilmente utilizables.



**Figura 4. PrHo: Programa de Riegos para cultivos Hortícolas y publicación elaborada por la Estación Experimental de la Fundación Cajamar con las recomendaciones de riego para los cultivos hortícolas**



## 6. Problemas medioambientales asociados con el riego

Los problemas medioambientales asociados al riego en el sistema de producción de hortalizas bajo invernadero de Almería son: (i) contaminación de acuíferos con nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), (ii) sobreexplotación de acuíferos profundos, (iii) ascenso del nivel freático del acuífero superficial del Campo de Dalías, y (iv) intrusión salina en el acuífero del Campo de Dalías. Obras de ingeniería como la construcción de plantas desaladoras y el bombeo del agua desde la Balsa del Sapo pueden ofrecer soluciones al menos parciales sobre estos últimos aspectos. La reducción de la contaminación con  $\text{NO}_3^-$  del acuífero requiere cambios en las prácticas de manejo del riego y la fertilización.

### 6.1. El problema de los nitratos y su relación con la actividad agrícola

La contaminación de los acuíferos con nitratos es consecuencia de la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  desde sistemas agrícolas. Los acuíferos que reciben drenajes de ecosistemas naturales tienen concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  muy bajas  $<5 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ . La lixiviación de nitratos consiste en el transporte vertical de nitratos disueltos en el agua de drenaje y está asociado al uso de fertilizantes nitrogenados en agricultura siendo común en la agricultura de regadío. La contaminación de acuíferos con nitratos es un tema de salud pública.

El consumo de aguas con nitratos puede inducir la enfermedad metahemoglobinemia, también conocida como “síndrome de los bebés azules” que afecta a niños pequeños. Por ello, existe legislación que limita la concentración de  $\text{NO}_3^-$  de las aguas potables, siendo la máxima concentración permitida por la Unión Europea (UE) de  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$ .

## 6.2. Legislación sobre nitratos en la agricultura

La Directiva Nitratos de la UE (Directiva 91/676/CEE del Consejo de 12 de diciembre de 1991) establece un nivel máximo de  $50 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$  en todas las aguas subterráneas y superficiales de la UE. Cuando la concentración de nitratos excede este límite, las zonas asociadas son declaradas ‘Zonas Vulnerables a la contaminación por Nitratos (ZVN)’, en las cuales se deben adoptar ‘programas de actuación’ encaminados a la reducción de la contaminación por nitratos de origen agrario. Aproximadamente el 40 % de la superficie de la UE-27 ha sido declarada ZVN. La directiva de nitratos ha sido incorporada dentro de la Directiva Marco de Agua (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000) que incumbe todos los aspectos relacionados con la calidad de los recursos hídricos naturales y tiene como objetivo que la contaminación de las aguas sea mínima para el año 2000. En España, esta directiva es implementada a nivel de comunidades autónomas. En el Decreto 36/2008 de 5 de febrero se designan 22 zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario en Andalucía, que en Almería incluyen el Campo de Dalías, Bajo Andarax, y Campo de Níjar. La Orden de 18 de noviembre de 2008 contiene los planes de actuación aplicables en las ZVN en Andalucía. Entre las prácticas requeridas están determinar la cantidad de fertilizantes nitrogenados (N) aplicados en función a la producción esperada, limitar el N aplicado en el estiércol, y llevar un cómputo de las aplicaciones de N de los cultivos registrándolas en “hojas de fertilización nitrogenada”.

## 6.3. Prácticas agrícolas que contribuyen a la lixiviación de nitratos

La elevada lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  está asociada a aplicaciones de fertilizantes N excesivas y a la ocurrencia de drenaje cuando el riego excede las necesidades hídricas del cultivo. Suelos de textura gruesa que drenan fácilmente y condiciones climáticas donde

son frecuentes las lluvias torrenciales en cultivos al aire libre favorecen la lixiviación de nitratos. Las aplicaciones excesivas de N ocurren cuando la aplicación de N disponible para la planta ( $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ ) excede claramente la extracción de N posible por un cultivo. El suministro de N incluye el N aplicado como fertilizantes N, el N mineralizado desde el estiércol y desde el N orgánico del suelo y el N mineral residual desde cultivos precedentes.

En cultivos en invernaderos de Almería en suelo, el drenaje está asociado con riegos excedentarios durante el periodo de establecimiento tras el trasplante y riegos de elevado volumen durante la desinfección/solarización y riegos pre-trasplante (Thompson *et al.*, 2007b). La fertilización excedentaria de N es consecuencia de aplicar programas de fertilización fijos que generalmente no consideran otras fuentes de N como las elevadas aplicaciones de estiércol (Thompson *et al.*, 2007b). Desde cultivos en sustratos a solución perdida en invernaderos, ocurren pérdidas de  $\text{NO}_3^-$  elevadas porque se suele drenar como mínimo el 20-30 % de la solución de riego.

#### 6.4. Prácticas agrícolas para un manejo óptimo de la fertilización nitrogenada

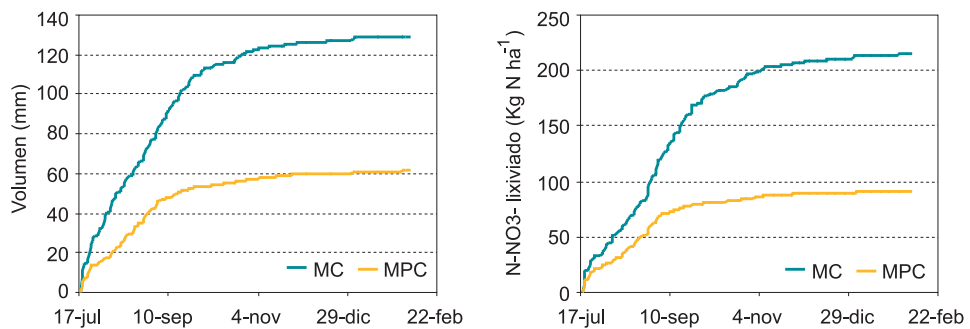
En varios estudios se han desarrollado prácticas de manejo de riego y fertilización nitrogenada, en cultivos intensivos, para minimizar las pérdidas de nitratos optimizando producción y calidad (Granados *et al.*, 2007). En primer lugar se consideran prácticas de manejo prescriptivas, considerando volúmenes de riego y aporte de N ajustados a la demanda del cultivo, obtenidos mediante modelización utilizando la información de cultivos desarrollados anteriormente bajo condiciones similares. En segundo lugar se propone considerar un manejo correctivo, mediante el uso de sensores que indican el estado de humedad y concentración de nitratos en el suelo durante el desarrollo del cultivo (Granados *et al.*, 2007).

En 2006 se desarrolló un cultivo de pimiento en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar. La prescripción de las necesidades de riego se basaron en la evapotranspiración del cultivo (Fernández *et al.*, 2001), y la prescripción del N absorbido por la planta en el modelo Nup desarrollado por Granados (2011). Para el manejo correctivo se utilizaron tensiómetros para mantener una humedad adecuada en el suelo, y sondas de succión para mantener constante la concentración de nitratos en la solución de suelo

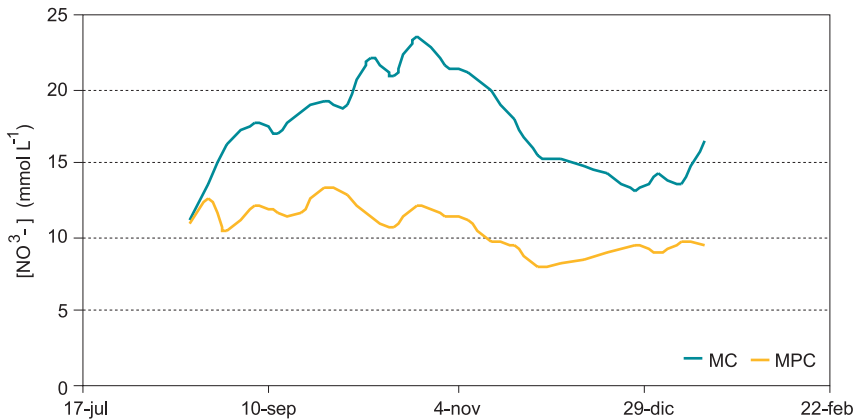
y un nivel de salinidad adecuado, durante el desarrollo del cultivo. Como resultado se redujo el volumen de riego desde 355 mm en el tratamiento convencional (MC) hasta 296 mm en el tratamiento con manejo prescriptivo-correctivo (MPC), y una reducción del volumen drenado de casi un 50 % (Figura 5). El uso de prácticas prescriptivas-correctivas de riego y aporte de N supuso una reducción de 176 kg N ha<sup>-1</sup> en el N aportado, lo que equivale a un 35 % del N aportado en el tratamiento convencional. La concentración de nitratos en el drenaje del cultivo con tratamiento mejorado fue 8,5-12 mmol L<sup>-1</sup>, mientras que en el tratamiento convencional alcanzó hasta 19 mmol L<sup>-1</sup>, y se redujo de manera importante la cantidad de nitrato perdida por lixiviación, hasta un 40 % respecto al tratamiento convencional (Figura 5).

Considerando, como método de monitorización del estado de N en el suelo, el uso de sondas de succión, la concentración de nitratos en la solución del suelo se mantuvo en 8-12 mmol L<sup>-1</sup>, durante la mayor parte del periodo de cultivo, mientras que en el tratamiento convencional se mantuvo en 14-24 mmol L<sup>-1</sup> (Figura 6). La producción de fruto, biomasa y absorción de N en el tratamiento con un manejo prescriptivo-correctivo fue similar a la obtenida en el tratamiento convencional, indicando que concentraciones de 8-12 mmol L<sup>-1</sup> en la solución del suelo no son limitantes para el desarrollo del cultivo, y que es posible ajustar el aporte de N a las necesidades del cultivo, obteniendo una importante reducción de nitrato perdido por lixiviación.

**Figura 5. Volumen acumulado de agua drenada y cantidad acumulada de nitrógeno en forma de nitrato (NO<sup>3</sup>-N) lixiviado en el tratamiento prescriptivo-correctivo (MPC) y convencional (MC)**



**Figura 6. Concentración de nitratos [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] en la solución del suelo a 15 cm de profundidad en el tratamiento prescriptivo-correctivo (MPC) y convencional (MC)**



## Referencias Bibliográficas

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (1998): “Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements”; FAO Irrigation and Drainage, Roma, FAO; p. 56.
- Baille, M.; Baille, A. y Laury, J. C. (1994): “A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area”; en *Scientia Horticulturae* (59); pp. 217-232.
- Bonachela, S.; González, A. M. y Fernández, M. D. (2006): “Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data”; *Irrig. Sci.*, (25); pp. 53-62.
- Bonachela, S.; Acuña, A. R. y Casas, J. (2007): “Environmental factors and management practices controlling oxygen dynamics in agricultural irrigation ponds in a semiarid Mediterranean region: Implications for pond agricultural functions”; en *Water Res.* (41); pp. 1225-1234.

- Carreño, J.; Aguilar, J. y Moreno, S. M. (2000): “Gastos de agua y cosechas obtenidas en los cultivos protegidos del campo de Níjar (Almería)”; *XVIII Congreso Nacional de Riegos*. Huelva, 20 al 22 de junio de 2000.
- Castilla, N. (1986): “Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almería: Necesidades hídricas y extracción de nutrientes del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno”. Universidad Politécnica de Madrid.
- Céspedes, A. J.; García, M. C.; Pérez-Parra, J. J. y Cuadrado, I. M. (2009): “Caracterización de la explotación protegida almeriense”. Almería, FIAPA, Fundación Cajamar.
- Casas, J. J.; Toja, J.; Bonachela, S.; Fuentes, F.; Gallego, I.; Juan, M.; León, D.; Peñalver, P.; Pérez, C. y Sánchez, P. (2011): “Artificial ponds in a Mediterranean region (Andalusia, southern Spain): agricultural and environmental issues”; *Water and Environ. J.* (25-3); pp. 308-317.
- De Villele, O. (1974): “Besoins en eau des cultures sous serre. Essai de conduite des arrosages en fonction de l’ensoleillement”; en *Acta Hortic.*, (35); pp. 123-129.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. (1977): “Las necesidades de agua de los cultivos”. *FAO Riego y drenaje*, (24), Roma, FAO.
- Fernández, M. D.; Orgaz, F.; Fereres, E.; López, J. C.; Céspedes, A.; Pérez, J.; Bonachela, S. y Gallardo, M. (2001): “Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español”. Almería, Cajamar (Caja Rural Intermediterránea).
- Fernández, M. D.; González, A. M.; Carreño, J.; Pérez, C. y Bonachela, S. (2007): “Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses”; *Agric. Water Manage.*, (89); pp. 251–260.
- Fernández, M. D.; Céspedes, A. y González, A. M. (2008): “PrHo V. 2.0: Programa de Riego para cultivos Hortícolas en invernadero”. *Documento Técnico (1)*. Almería, Fundación Cajamar.

- Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson, R. B.; López, J. C.; Granados, M. R.; Gallardo, M. y Fereres, E. (2010): “ Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate”; en *Irrig. Sci.*, (28); pp. 497-509.
- Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2003a): “Relaciones hídricas en suelo y planta”; Fernández, M. *et al.* (eds.): *Mejora de la Eficiencia en el Uso del Agua en Cultivos Protegidos*. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía; pp. 71-94.
- Gallardo, M. y Thompson, R. B. (2003b): “Uso de los sensores de planta para la programación del riego”; Fernández, M. *et al.* (eds.): *Mejora de la Eficiencia en el Uso del Agua en Cultivos Protegidos*. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía; pp. 353-374.
- Gallardo, M.; Thompson, R. B.; Valdez, L. C. y Fernández, M. D. (2006): “Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops”; *Journal of Horticultural Science&Biotechnology*, (81); pp. 483-495.
- Granados, M. R.; Thompson, R. B.; Fernández, M. D.; Gázquez-Garrido, J. C.; Gallardo, M. y Martínez-Gaitán, C. (2007): “Reducción de lixiviación de nitratos y manejo mejorado de nitrógeno con sondas de succión en cultivos hortícolas”; *Colección Agricultura*, Fundación Cajamar, Almería.
- Granados, M. R. (2011): “Lixiviación de Nitratos desde Cultivo de Invernadero en Suelo en las Condiciones de Almería: Magnitud, Factores Determinantes y Desarrollo de un Sistema de Manejo Optimizado”. *Tesis Doctoral*, Universidad de Almería.
- Lorite, I. J.; Mateos, L. y Fereres, E. (2004): “Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers”; *Irrig. Sci.*, (23); pp. 85–92.
- Lupiañez, N. (2009): “Caracterización y evaluación de instalaciones de riego localizado del Campo de Dalías”. *Proyecto Fin de Carrera*, Universidad de Almería.



- Martínez Álvarez, V.; Calatrava Leyva, J.; Maestre Valero, J. F. y Martín Górriz, B. (2009): "Economic assessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate"; *Agric. Water Manage.* (96); pp. 1351-1359.
- Merriam, J. L. y Keller, J. (1978): "Farm Irrigation System Evaluation"; Utah, State University.
- Malano, H. y Burton, M. (2000): "Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector"; *IPTRID Secretariat, FAO*, Rome.
- Medrano, E.; Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M. C. y Montero, J. I. (2005): "Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions"; *Scientia Hortic.* (105); pp. 163-175.
- Meek, D. W. y Hatfield, J. L. (1994): "Data quality checking for single station meteorological databases"; *Agricultural and Forest Meteorology* (69); pp. 85-109.
- Orgaz, F.; Bonachela, S.; Cuevas, R.; De Los Rios, E.; Montero, J. I.; Castilla, N. y Fereres, E. (1986): "Evaluación de sistemas de riego localizado en cultivos bajo invernadero en Almería"; *II Congreso Nacional de la S.E.C.H. 21-25/04/1986*, Córdoba, España.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M. y Fereres, E. (2005): "Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse"; *Agric. Water Manage.* (72); pp. 81-96.
- Peña, M. T. (2009): "Estimación a escala regional de los flujos de agua y la lixiviación de nitratos en el Campo de Dalías"; *Proyecto Fin de Carrera*, Universidad de Almería.
- Sánchez-Martos, F.; Pulido-Bosch, A. y Calaforra, J. M. (1999): "Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe (Almería, SE Spain)"; *Applied Geochemistry* (14); pp. 735-745.
- Stanghellini, C. (1987): "Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management"; *Ph.D. Dissertation*. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

- Thompson, R. B. y Gallardo, M. (2003): “Programación de riegos mediante sensores de humedad en suelo”; Fernández, M. *et al.* (eds.): *Mejora de la Eficiencia en el Uso del Agua en Cultivos Protegidos*. Dirección General de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía; pp. 375-402.
- Thompson, R. B.; Gallardo, M.; Agüera, T.; Valdez, L. C. y Fernández, M. D. (2006): “Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops”; *Irrigation Science* (24); pp. 185-202.
- Thompson, R. B.; Gallardo, M.; Fernández, M. D.; Valdez, L. C. y Martínez-Gaitán, C. (2007a): “Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor”; en *Soil Science Society of America Journal* (71); pp. 1647-1657.
- Thompson, R. B.; Martínez-Gaitán, C.; Gallardo, M.; Giménez, C. y Fernández, M. D. (2007b): “Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey”; *Agricultural Water Management*, (89); pp. 261-274.



## CULTIVO PROTEGIDO DE ESPECIES FRUTALES

Hueso Martín, J. J.<sup>(1)</sup>; Alonso López, F.<sup>(1)</sup>; Pinillos Villatoro, V.<sup>(2)</sup>; Cuevas González, J.<sup>(2)</sup>  
Fundación Cajamar<sup>(1)</sup> y Universidad de Almería<sup>(2)</sup>

### RESUMEN

La producción de frutas bajo invernadero data del siglo XVII y aunque en la actualidad este modelo productivo no está muy extendido, puede ser una alternativa interesante y muy rentable para especies de alto valor en áreas en las que la producción hortícola intensiva está perdiendo rentabilidad. La ampliación de los ciclos de cultivo para producir en épocas más favorables, el incremento de la productividad y la calidad y la extensión de las áreas de cultivo, con el uso de los invernaderos, son las claves del éxito. Características específicas de los frutales como su carácter perenne, el tamaño de los árboles o las necesidades de acumular horas de frío para brotar, plantean nuevos retos. En este capítulo se recogen ejemplos de producción en invernadero de cultivos tropicales (plátano y papaya), subtropicales (mango, níspero japonés), mediterráneos (uva de mesa) y de zonas templadas (melocotonero y cerezo).

### SUMMARY

*Greenhouse cultivation of fruit crops is not certainly a new orientation, since can be dated back to the XVII Century. Despite it currently occupies a reduced area in Spain, the protected cultivation of high value fruit crops emerges as an interesting and profitable alternative for areas in which greenhouse cultivation of vegetables loses interest. Economic success in greenhouse fruit tree cultivation relies on the possibility to produce out of season yields, on producing in areas where outdoor climate precludes it, and on the common increase of fruit quality and productivity achieved under protection. The perennial nature and large size of the trees as well as the winter chill requirements of some species represent additional challenges for the success of this enterprise. In this chapter, examples of protected cultivation of tropical (banana and papaya), subtropical (mango and loquat), Mediterranean (table grapes) and temperate-zone (peach and cherry) crops are (given) described.*

## 1. Introducción

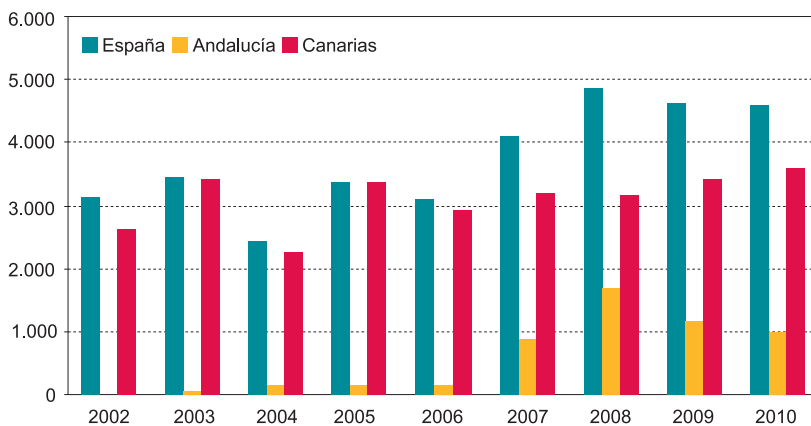
De todos los factores del medio que inciden en la producción frutal el clima es el parámetro que más influye sobre la producción debido al escaso control que podemos ejercer sobre él. Los medios de transporte, el conocimiento de los métodos de propagación y los procesos de selección y de mejora, (en definitiva, la participación del hombre) han permitido que muchas especies frutales se cultiven en zonas diferentes a las de su origen. Para alcanzar la óptima productividad de estos cultivos es necesario en muchos casos modificar el entorno natural mediante técnicas diversas. Esta modificación del medio es lo que se conoce como protección del cultivo.

El cultivo protegido de frutales no es algo nuevo. Ya en el siglo XVII en Francia se cultivaban frutales en invernadero cuando la realeza plantaba especies sensibles al frío como la piña tropical, la palmera datilera o el naranjo, en macetas móviles que situaban en invernaderos en invierno y sacaban al exterior en primavera. Posteriormente, a inicios del siglo XX aparecen en Inglaterra huertos comerciales con frutales en invernadero cultivados en macetas. Uno de los mayores problemas para el cultivo de frutales en invernadero era el gran tamaño de los árboles. El mayor control del tamaño con el uso de patrones enanizantes y los avances en los sistemas de formación, abrieron nuevas posibilidades para el cultivo de frutales en invernadero.

Sin embargo, el cultivo protegido de frutales está aún muy restringido en la actualidad. En la cuenca mediterránea, una de las principales áreas de cultivo protegido, las hortalizas son la principal opción y los frutales sólo ocupan un reducido porcentaje de la superficie total. En Japón, por el contrario, el cultivo de frutales en invernadero alcanzaba las 10.000 ha a principios de los 90, superando en superficie a los cultivos hortícolas y de flor. En China, esta orientación se ha incrementado espectacularmente en los últimos 20 años, y la superficie protegida alcanzó las 60.000 ha en 2000, de las cuales el 70 % estaban dedicadas a la producción de fresa, seguidas de la uva de mesa y el melocotonero.

En España, según la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (MARM, 2010) existen alrededor de 4.600 ha de frutales en invernadero, cifra que se eleva a 10.600 ha si se considera el cultivo de la fresa<sup>1</sup> (Figura 1). Canarias es la principal región, con el 78 % de la superficie total, seguida por Andalucía con un 21%, y muy de lejos ya por la Comunidad Valenciana, con solamente un 0,3 %.

**Figura 1. Evolución de la superficie de cultivo frutal en invernadero en España. En cuestra sobre superficies y rendimientos de los cultivos (MARM, 2002-2010)**

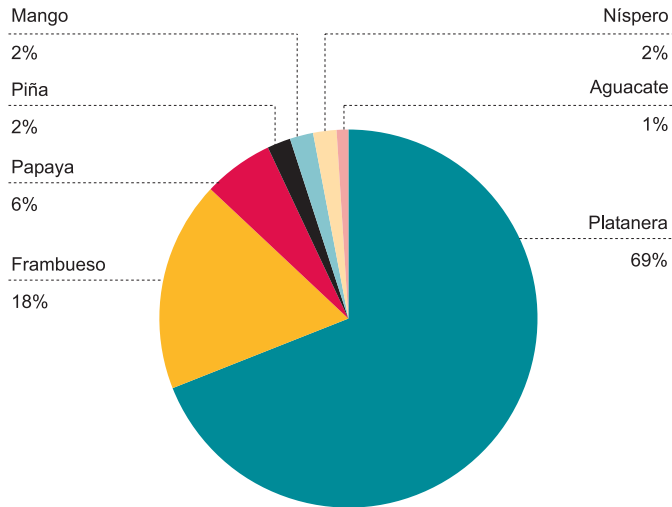


El principal frutal cultivado en invernadero en España es la platanera (Figura 2), producido casi exclusivamente en Canarias, donde su cultivo en invernadero se inició a finales de los 70. En la actualidad existen alrededor de 3.000 ha, que suponen un tercio de la superficie total. En segundo lugar está el frambueso, del cual se cultivan bajo túnel alrededor de 800 ha, todas ellas en Andalucía. En Canarias también se cultivan en invernadero otros frutales como la piña y la papaya, con una superficie que oscila entre 100 y 200 ha, y el mango con 57 ha. En Andalucía se cultivan en invernadero uva de mesa (140 ha), mango (40 ha) y níspero japonés (90 ha).

Hay que destacar que las estadísticas son muy variables según el año, sobre todo en algunos cultivos. Asimismo, las estadísticas no recogen la superficie de cultivo protegido bajo malla, frecuente en Alicante para el níspero japonés, o el cultivo semiforzado bajo malla o cubiertas plásticas que se da de manera bastante generalizada para la producción de uva de mesa en Murcia.

<sup>1</sup> La fresa, cultivada casi en exclusiva en Andalucía, es considerada como hortaliza en las estadísticas del MARM, si bien en otros muchos países se considera frutal; el cultivo del frambueso, sin embargo, sí está incluido como frutal en las estadísticas del MARM.

**Figura 2. Distribución de la superficie total de frutales de invernadero en España (ESYRCE, MARM 2010)**



Con superficie aún muy reducida, y en algunos casos a un nivel sólo experimental, en Cataluña y Murcia se está empezando a cultivar cerezo y melocotonero en invernadero, con el objetivo de obtener cosechas muy precoces que redunden en altos precios. El cultivo en invernadero de estos frutales, especialmente el melocotonero, así como de otros subtropicales como el mango o el níspero japonés, se están planteando como una interesante alternativa a los cultivos hortícolas en invernadero en zonas de Andalucía y Murcia, donde éstos están perdiendo rentabilidad.

## 2. Objetivos del cultivo protegido

El establecimiento de plantaciones frutales en invernadero constituye un modelo productivo que permite extender las áreas de producción y los ciclos de cultivo, aumentar las producciones y mejorar la calidad. Esto facilita un suministro estable de productos de alta calidad al mercado. Esto es posible porque el invernadero protege al cultivo de las bajas temperaturas y permite adaptar la temperatura y humedad ambiente a las condiciones óptimas para su desarrollo. Además puede reducir la incidencia de plagas y enfermedades, facilitar el control de malas hierbas y proteger al cultivo frente al viento, granizo y golpes de sol.



El objetivo último del cultivo protegido es la obtención de producciones de alto valor añadido, lo que se consigue aumentando la producción y calidad, obteniendo cosechas en épocas más favorables modificando los ciclos de cultivo y extendiendo las áreas de producción.

### 3. Invernaderos empleados en fruticultura

Como se ha indicado, el empleo de un invernadero persigue la obtención de una mayor rentabilidad, por lo que el mejor diseño debe ser el resultado de un compromiso entre los requerimientos técnicos y los costes derivados de su construcción. Conseguir un compromiso entre estos requisitos no resulta fácil, de ahí que ningún diseño sea perfecto. Se trata, por tanto, de priorizar en cada caso los criterios a seguir.

La elección del tipo de invernadero a construir depende de diversos factores. El primero de ellos es la función prioritaria que va a desempeñar: protección frente a viento, lluvia, frío, etc. El segundo factor que influye es el clima local y la latitud del lugar, seguido por las exigencias de la especie frutal a cultivar. Hay que considerar además la influencia de las condiciones socioeconómicas de la zona. Fruto de la interacción entre estos factores encontramos una variada gama de invernaderos que van desde estructuras simples de bajo coste (p.ej. invernadero de malla) hasta estructuras más complejas y de mayor coste (p.ej. invernadero multitúnel), que incluso pueden contar con instalaciones de control climático (calefacción, *cooling*,...) si el microclima generado por el invernadero no es siempre el más adecuado. En todo caso es habitual el empleo de estructuras que no han sido específicamente diseñadas para especies frutales, que como veremos más adelante presentan una serie de condicionantes para su cultivo en invernadero que habría que considerar.

Los invernaderos más sencillos que encontramos en fruticultura son aquellos en los que el cerramiento es de malla (Figura 3). Su función principal es proteger frente al viento (“efecto cortavientos”) y contra el granizo. Aunque éstas sean sus funciones principales el uso de la malla supone también la generación de un “efecto oasis”, es decir, una mejora del microclima en el entorno del cultivo que se traduce en la consecución de cosechas mejores en cantidad y calidad y en una mejora en la eficiencia en el uso del agua, especialmente en zonas de clima seco o semidesértico. En el sector frutícola

**Figura 3. Cultivo protegido de uva de mesa bajo malla y bajo plástico**

español, el invernadero de malla se emplea en cultivos de piña, platanera, níspero japonés y uva de mesa. Se trata de invernaderos artesanales de bajo coste. La estructura de este tipo de invernadero suele ser tipo parral, con cubierta plana o multicapilla (“raspa y amagado”) con postes de acero galvanizado (aunque todavía los hay de madera). La altura de estos invernaderos depende de la especie que albergue y oscila entre 2,5 y 7 m. Las mallas se sujetan por un doble tejido de alambre y se cambian cada 5 años. Encontramos invernaderos con cerramiento de plástico cuando además de proteger al cultivo frente a lluvias y granizo (“efecto paraguas”) se persigue un control del clima aumentando la temperatura respecto al aire libre (“efecto invernadero”) (Figura 3). El uso de los invernaderos plásticos en el sector de la fruticultura en España se concentra en la actualidad en los cultivos de plátano, papaya, mango y uva de mesa. Los invernaderos plásticos usados para plátano, papaya y mango suelen ser tipo parral plano con el plástico sujeto entre un doble tejido de alambre. El plástico se cambia cada 2-3 años. La ventilación se consigue mediante ventanas laterales y cenitales. Para el cultivo protegido de la uva de mesa, la estructura es prácticamente igual a la anterior salvo que la cubierta del parral suele ser multicapilla (“raspa y amagado”). La cubierta suele ser temporal y solo se extiende por el techo y no por las bandas de la estructura, por lo que se trata de un cultivo semiforzado. En la Estación Experimental de la Fundación Cajamar se ha cultivado con éxito uva de mesa en un invernadero tipo parral plano con cubierta plástica de polietileno (PE) y ventanas cenitales y laterales con apertura y cierre automatizado, con un equipo de control de clima, igual al empleado para el cultivo de hortalizas en esta zona. En los últimos años se están llevando a cabo también investigaciones en lo referente al material de cubierta para el cultivo en invernadero de especies frutales, así como el empleo de mallas de colores fotoselectivas.

Por último, como algo novedoso se están reutilizando invernaderos plásticos tipo multitúnel originariamente diseñados para hortícolas, para el cultivo de melocotón, nectarina y cerezo en Murcia y en Cataluña. Este tipo de invernaderos suelen tener una altura media interior de 5 m y cuentan con ventanas laterales y cenitales (ventilación natural) que se abren de forma manual o automatizada. En el caso del cerezo se usa en ocasiones apoya térmico.

## 4. Condicionantes para el cultivo bajo abrigo de especies frutales

### 4.1. Temperaturas

Los frutales son especies cultivadas de carácter perenne, esto es, cultivos que permanecen sobre el terreno largo tiempo, generalmente decenas de años, antes de poner fin a la empresa de su cultivo. No son como las hortalizas, especies anuales en las que la cosecha pone fin al ciclo de cultivo. Esto implica que el frutal cultivado en invernadero permanece 'a priori' bajo abrigo ininterrumpidamente todo el año. Esta circunstancia plantea dificultades de manejo, especialmente durante el verano, pues las elevadas temperaturas durante el estío afectan muy negativamente al desarrollo del frutal bajo invernadero. Diferentes condiciones se presentan para el cultivo bajo malla, o con estructuras bien ventiladas que no elevan, al menos sustancialmente, la temperatura en su interior.

Para eliminar, o al menos paliar en parte, estas dificultades las estructuras utilizadas para el cultivo de frutales en invernadero cerrado deben diseñarse de modo que la cubierta plástica pueda retraerse durante las épocas de más calor, incluso si la cosecha que se persigue anticipar aún no ha alcanzado la maduración. Idealmente las estructuras invernadas deben disponer de mecanismos automatizados de apertura y cierre de la ventilación, con consignas establecidas en función al óptimo para el cultivo, que permitan maximizar el adelanto fenológico que se consigue durante el invierno y primavera.

No sólo durante el verano cuando se plantean desafíos en el cultivo de los frutales en invernadero. El empleo de una cubierta plástica durante el invierno también plantea dificultades para los frutales de zonas templadas que precisan de cierta cantidad de frío invernal (requerimientos de horas-frío) para el correcto abandono del reposo invernal.

Efectivamente, este grupo de frutales, y en menor medida los mediterráneos, precisan de un cierto periodo de frío para que las yemas abandonen el reposo, broten y alcancen la floración. En ausencia del suficiente frío invernal, las yemas permanecen en reposo a la espera de que el invierno pase lo que desemboca en una brotación escasa e irregular. Por todo lo anterior, los frutales de zonas templadas cultivados en invernadero deben permanecer expuestos a las temperaturas bajas exteriores, antes de cubrir con plástico o cerrar el invernadero. Es cierto que la inversión térmica procura en determinados días temperaturas en el interior del invernadero incluso inferiores a las del exterior; sin embargo, este fenómeno resulta por lo común insuficiente para que el frutal cumplimente sin dificultad sus requisitos de frío invernal. No se plantean al presente tampoco procedimientos de refrigeración del invernadero que ayuden a solventar este problema. La reciente prohibición del uso de la cianamida de hidrógeno en la UE, producto ampliamente usado en zonas cálidas por su eficacia para sustituir parcialmente al frío invernal, dificulta aún más el cultivo de las actuales variedades de frutales de zonas templadas en invernadero. Resulta también oportuno subrayar las dificultades que supone una marcada amplitud térmica con elevadas temperaturas durante el día y bajas durante la noche para la brotación temprana de los frutales de zonas templadas. En estas circunstancias se producen daños sobre la vegetación (hojas abullonadas, marchitez de brotes, necrosis apical,...), que dificultan el normal desarrollo de estos frutales.

## 4.2. Selección de cultivos. Entrada en producción y duración del ciclo

A pesar de todo lo anterior, el cultivo protegido de frutales de zonas templadas con requerimientos de horas-frío como el cerezo se extiende, eso sí, programando la cubierta plástica cuando estos requisitos de frío se han cubierto (mitad de enero-febrero). Este procedimiento asegura un adecuado desarrollo del frutal y una temprana maduración de las cerezas. En este sentido resulta más atractivo el cultivo de especies de ciclo corto, porque la cubierta plástica se ha de mantener por menos tiempo gracias a su recolección temprana.

El cultivo bajo plástico se plantea allí donde el elevado precio de la fruta permite asimilar el incremento en costes que supone la estructura invernada frente al cultivo al aire libre. Frutales de amplio cultivo y elevada productividad al aire libre tienen más difícil el éxito comercial. Con el mismo objetivo de alcanzar mayor rentabilidad y una

más rápida recuperación de la inversión es también conveniente la selección de cultivos de reducido tamaño, que permitan su mantenimiento en estructuras de menor altura y coste. Siendo, por el contrario, más complicado el manejo de frutales de elevado vigor. Este exceso de vigor puede agravar un déficit de iluminación que la cubierta plástica impone. Muchos frutales responden negativamente a la falta de luz, en variados procesos (fotosíntesis, crecimiento, coloración de los frutos, inducción floral, etc...).

Un último aspecto a destacar en el éxito comercial del cultivo protegido de los frutales sería la rápida entrada en producción. Un cultivo que tardara más de 4-5 años en alcanzar las primeras producciones difícilmente justificaría una estructura invernada. Su construcción posterior sobre árboles ya en producción sería, por otra parte, más complicada. Al hilo de lo anterior, hay que señalar que muchos de los frutales más cultivados bajo plástico, aunque perennes, son de naturaleza herbácea. Así el plátano, la papaya, la piña tropical, pero también los llamados pequeños frutos (frambuesa, arándanos, zarzamora...) y la fresa, fructifican en muy breve plazo y permiten un carácter más especulativo de su cultivo bajo plástico (invernadero o túnel) de modo que la toma de decisiones y su prolongación bajo esta premisa pueda ser revocada sin perjuicio económico grave.

## 5. Cultivos de mayor interés en España

### 5.1. Plátano (*Musa acuminata* Colla AAA)

También conocido como banana, el plátano es susceptible de ser cultivado en el Sur de España en invernadero plástico, tal y como se realiza en el Norte de Marruecos y las Islas Canarias. El cultivo bajo plástico del plátano persigue en primer lugar un incremento de temperaturas, de modo que el número de horas por encima de 20 °C aumente a lo largo del día, en las diferentes estaciones del año. Esto permite reducir el ciclo del cultivo a menos de 13 meses desde la plantación a la primera cosecha y programar de un modo más confiable y efectivo las fechas de recolección en momentos de mejor precio. El cultivo bajo plástico también repercute en mayores rendimientos, con racimos más numerosos y pesados, y con plátanos también de mayor tamaño. Esta mejora de la calidad se explica, al menos en parte, por la mayor superficie fotosintética de las plantas crecidas bajo abrigo, ya que los daños por viento sobre las grandes láminas foliares disminuyen (Figura 4); esta protección es extensiva al granizo, lluvia, o



Figura 4. Cultivo protegido de plátano en invernadero

golpes de sol sobre el fruto. Además, bajo plástico las necesidades de riego del cultivo se reducen en hasta un 25 %. Se argumenta también que el cultivo protegido permite mejor control sanitario, en particular contra la enfermedad Sigatoka, causada por el hongo *Mycosphaerella*, cuyas conidias y ascosporas se diseminan por el viento.

El plátano puede cultivarse bajo estructuras protegidas de malla o plástico (o combinación de ambos) generalmente de 5 a 7 m de altura. En ambos casos se suele realizar una estructura de acero galvanizado sobre bases de hormigón, con la cubierta sujeta con emparrillado de alambre. Las mallas se prefieren en zonas más cálidas donde la protección contra el viento es objetivo central, mientras que los plásticos se utilizan en zonas más frías, aunque ocasionalmente se requiera su remoción en el verano.

Los condicionantes sobre la altura de la estructura han hecho que las variedades de bajo porte sean hoy preferidas, observándose en las Islas Canarias un aumento de la superficie dedicada a ‘Cavendish Enana’ y ‘Cavendish Gruesa’, un clon de aquella, en detrimento de ‘Cavendish Gigante’ (sinónimo ‘Grande Naine’).

El plátano se multiplica por hijuelos que se plantan en número de dos ó tres por hoyo. Las densidades de plantación son muy elevadas, en especial bajo plástico, llegando a alcanzar hasta 1.700 plantas ha<sup>-1</sup>, con distancias de 2,6 x 2,6 m hasta 3 x 3 m en marco real o al tresbolillo. Las plantaciones más modernas tienden a realizarse con separación de 1,7 m entre plantas, pero con pasillos más amplios de 5-6 m para facilitar labores. De esta forma se alcanzan densidades de hasta 2.400 plantas ha<sup>-1</sup>, ubicando dos plantas por hoyo para, tras la fructificación de la planta madre, desarrollar el hijuelo para la próxima cosecha. En el primer ciclo de cosecha las densidades pueden ser incluso superiores, de hasta 4.000 plantas ha<sup>-1</sup>, aunque se recomienda eliminar la mitad de ellas en el segundo ciclo y posteriores. En ocasiones, se prefiere una sola planta por hoyo con plantación en filas alternas en primavera y en verano, para así escalonar las cosechas.

El plátano, aunque frutal, es de naturaleza herbácea y crecimiento monopodial. Este hábito de crecimiento hace que un rápido crecimiento sea positivo para la producción. Así y todo, es necesario un deshojado de las hojas basales senescentes cuando la

vegetación deriva en sombreado excesivo. El deshidado es obligatorio cuando se producen rebrotes en exceso a los necesarios para sustituir a la planta madre. El abonado es igual al realizado al aire libre, mientras que el consumo de agua se sitúa en torno a  $12.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , aunque el cultivo bajo abrigo y el riego localizado lo disminuyen un 25 %. El control fitosanitario no difiere del realizado al aire libre, aunque los nematodos *Meloidogyne incognita* y *M. javanica* y *Pratylenchus* pueden ser un problema mayor en suelos enarenados. El virus del mosaico del pepino (CMV) afecta también al plátano y hay que controlar el material vegetal y los vectores del virus; la incidencia de mosca blanca parece menor en cultivo protegido.

## 5.2. Papaya (*Carica papaya* L.)

El cultivo en invernadero permite la producción de papaya en zonas subtropicales como las Islas Canarias y la costa andaluza, elevando la temperatura a un rango óptimo para esta especie, ( $T^a \text{ base}=15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T^a \text{ óptima}= 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ). El cultivo bajo plástico ofrece además protección contra el viento. Si bien la papaya es algo menos sensible a este meteoro, el cultivo en invernadero reduce el consumo de agua al disminuir la evapotranspiración. La elevada incidencia del virus de la mancha anular de la papaya (PRSV) al aire libre también hace aconsejable el cultivo protegido. Bajo plástico, sin embargo, hay una mayor incidencia de ácaros, nematodos y enfermedades fúngicas a la que este cultivo es especialmente sensible (antracnosis, oídio, *Phytophthora parasitica* y otras). Por ésta y otras razones, las papayas no deben cultivarse en terrenos demasiado húmedos y compactos con mal drenaje, ya que la especie no soporta el encharcamiento. También presenta graves problemas con la salinidad. El cierre hermético del invernadero puede provocar déficits de polinización, en una especie que se cree polinizada por viento, trips y polillas nocturnas. En algunos emplazamientos se prefiere por ello implementar una polinización manual.

Las estructuras de cultivo no difieren mucho de las ya comentadas para el plátano. Por sus mayores necesidades térmicas la cubierta es usualmente de plástico (PE), aunque según localización también puede ser de malla buscando mayor duración de la cubierta. La estructura está formada por tubos de hierro galvanizado de 6-7 m de longitud y diámetro de 2-4 pulgadas. Existe una marcada tendencia al uso de variedades de menor porte ('Baixinho de Santa Amalia', 'BH-65', 'Siluet', 'Maradol'...), dado el hábito



de crecimiento monopodial de la papaya. El crecimiento rápido es necesario, ya que la primera fruta aparece entre los nudos 18 y 34, según variedad. Es de destacar la conducción inclinada de las plantas, a veces de dos en dos por hoyo, a la que el cultivo se adapta muy bien. Los marcos de plantación fluctúan entre 1,5 x 1,5 m hasta 3 x 3 m (Figura 5). La plantación es también posible en filas pareadas, dejando en este caso calles más amplias.

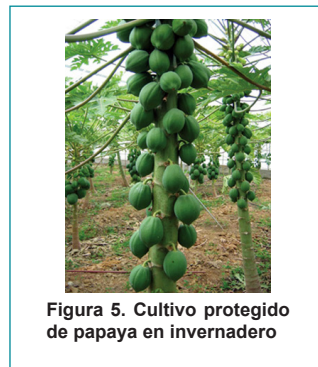


Figura 5. Cultivo protegido de papaya en invernadero

La papaya se multiplica por semilla, rara vez mediante esqueje. La situación se complica porque muchos tipos de papaya son dioicos. Hay también pies hermafroditas, sin problemas de polinización. Si no se tiene certeza del sexo de la planta es mejor sembrar 3-4 semillas por hoyo, y eliminar las sobrantes a los 45-60 días, dejando sólo plantas hermafroditas o en su caso 15 hembras por macho. La siembra puede hacerse también en semillero y trasplantar con 10-15 cm. La micorrización da resultados espectaculares. La fructificación se produce a los 10-12 meses después del trasplante, realizado en primavera-verano, rara vez en noviembre buscando mejor precio. Se aconseja realizar aclareos frutos, eliminando los defectuosos y distribuyendo los frutos de forma que no se dañen entre sí. La cosecha se establece en torno a 30-40 kg por planta y año, a una cadencia de 2-4 frutos por semana. Hay una fuerte tendencia a la selección de variedades de tipo hawaiano con frutos de 400-500 g.

### 5.3. Mango (*Mangifera indica* L.)

El mango es otro cultivo tropical que se ha adaptado bien a las zonas subtropicales, donde las bajas temperaturas reducen el tamaño de los árboles y el periodo improductivo, permitiendo una mayor densidad de plantación y una rápida entrada en producción. Además, las bajas temperaturas actúan como inductoras de la floración, incrementando notablemente los rendimientos (30 t ha<sup>-1</sup>) y concentrando la producción. Sin embargo, el mango por su condición tropical requiere un invierno con temperaturas mayores de 10 °C, primavera con temperaturas por encima de 15 °C, verano y otoño cálidos (27-36 °C) y ligeras variaciones de temperatura entre el día y la noche. Estas condiciones se dan en España en las Islas Canarias y en la Costa Tropical (Granada-



Málaga), aunque su cultivo podría extenderse en áreas próximas del SE peninsular. El mayor control climático permite asimismo obviar la eliminación de panículas que al aire libre se realiza para asegurar una segunda floración tardía que cuaje en mayor medida.

En España el cultivo del mango en invernadero es incipiente. En la Costa Tropical se estima que hay unas 15 ha que surgen como alternativa al cultivo bajo invernadero de hortalizas de baja rentabilidad. En las Islas Canarias no hay más de 10 ha. Con el cultivo de mango bajo plástico en estas zonas se persigue principalmente adelantar la recolección para conseguir mejores precios. A nivel mundial el cultivo del mango en invernadero se lleva a cabo principalmente en el sur de Japón, donde cuenta con alrededor de 200 ha. Las razones por las cuales el mango se cultiva en invernadero en Japón son climáticas y económicas. Las lluvias persistentes y la baja radiación durante la floración y desarrollo del fruto provocan antracnosis y bajo cuajado de frutos, por lo que no es posible su cultivo al aire libre. Además las fuertes restricciones para la importación de fruta, por seguridad fitosanitaria, provocan que los precios para la producción local lleguen a alcanzar 50-100\$ kg<sup>-1</sup>, que garantizan una alta rentabilidad.

La estructura utilizada es tipo multitúnel o tipo parral con doble techo y materiales que le confieran suficiente solidez para soportar tifones. Además están dotados de sistema de ventilación y calefacción. Las variedades más utilizadas son 'Irwin', 'Sensation', 'Keitt' y 'Haden' injertadas sobre 'Formosa' dispuestas a 2,5 x 2,5 m inicialmente y 5 x 5 m en la plantación definitiva (Figura 6).



Figura 6. Cultivo protegido de mango en invernadero tecnificado en Japón

Para controlar el tamaño del árbol se restringe el crecimiento radicular cultivando en contenedores. Después de recolección se podan los brotes terminales para estimular el crecimiento vegetativo antes de la diferenciación floral. La calefacción mantiene la temperatura nocturna por encima de los 23 °C y la ventilación es necesaria durante la floración y el cuajado para no superar los 35 °C.

En el caso de la Costa Tropical los invernaderos suelen ser tipo parral con cubierta multicapilla (raspa y amagado) con una altura máxima de 4 m y en el lateral 3,5 m. La ventilación es natural con ventanas laterales y cenitales. Las variedades más utilizadas

son 'Tommy Atkins' y 'Osteen' injertados sobre Gomera-3 y en algunos casos formados en espaldera. Se puede conseguir un adelanto de hasta un mes, lo que supone un aumento en el precio de hasta 0,50 €/kg por kilo. En el invernadero se observa una menor incidencia de oidio y bacteriosis, gracias al mejor control de temperatura y humedad y a la protección frente al viento y lluvia. En algunos casos se han observado problemas de maduración y calidad asociados a las altas temperaturas. El manejo del cultivo es similar al realizado al aire libre.

En Canarias los invernaderos para el mango son tipo parral plano de 6-7 m de altura (tipo banana). Los principales cultivares son Irwin, Tommy Atkins, Lippens y Torbet injertados sobre Gomera-1 a un marco de 3 x 4 m. Es frecuente el cultivo intercalar de piña durante los primeros años. Con el cultivo bajo plástico se mantienen temperaturas próximas al óptimo durante floración y desarrollo del fruto por lo que se obtienen mayores producciones (hasta 38 t ha<sup>-1</sup>). La mayor precocidad junto con las restricciones a la importación pueden rentabilizar este sistema productivo.

#### 5.4. Níspero japonés (*Eriobotrya japonica* Lindl.)

El níspero es un frutal subtropical que florece en otoño, desarrolla los frutos en invierno y se recolecta a principios de primavera, lo que favorece su venta como una de las primeras frutas de temporada. La precocidad y calidad son claves para la comercialización. Los frutos recolectados al inicio de la campaña alcanzan los mayores precios por lo que todas las técnicas que supongan un adelanto en la recolección repercutirán positivamente en el balance económico de la explotación.

Con el cultivo en invernadero se consigue adelantar la maduración para producir fruta extratemprana que alcance precios elevados en el mercado, proteger frente al viento, que provoca el taramado del fruto ocasionando pérdidas de hasta el 50 % de la cosecha, y proteger del golpe de sol y de los daños que provocan el granizo y los pájaros. El principal inconveniente es el coste de la estructura a pesar de su sencillez. Los invernaderos son planos o multicapilla con postes de acero galvanizado y emparillado de alambre. Cuando la cubierta es de malla la altura es de 5-6 m, mientras que con cubiertas de plástico son más bajos (2,5 m en laterales y 4 m en techo) (Figura 7).

**Figura 7. Cultivo de nípero bajo malla (izquierda) y bajo plástico (derecha)**

Las variedades más cultivadas bajo abrigo son *Algerie* y *Golden Nugget*, injertadas sobre membrillero y formados en eje central para reducir el tamaño de los árboles, lo que permite una mayor densidad de plantación (hasta 1.500-2.000 plantas ha<sup>-1</sup>). El manejo del cultivo no difiere del realizado al aire libre.

El adelanto de cosecha conseguido con cultivo bajo plástico es muy variable y depende de la variedad y del lugar. Así con '*Algerie*' en España se citan entre 6-12 días de adelanto, mientras que estudios con '*Golden Nugget*' en Turquía hablan de hasta 20 días de adelanto. Cuando el adelanto no es importante no se compensan los costes que supone la estructura. Además, en algunos casos la fruta bajo plástico presenta una mayor incidencia de mancha morada, asociada a la mayor precocidad, y problemas de tamaño y calidad interna del fruto. Cuando la cubierta es de malla también se consigue cierta precocidad, aunque algunos trabajos recogen un retraso en la maduración, no obstante, más concentrada. Bajo plástico y bajo malla el desarrollo de los árboles es más rápido por lo que se consigue una rápida entrada en producción y mayor cantidad de fruta en los primeros años, así como mayor uniformidad y calidad de la cosecha. No obstante bajo malla se han detectado problemas de falta de color del fruto, mientras que la incidencia de moteado es mayor por falta de ventilación. También se han observado cuajado insuficiente algunos años con '*Algerie*' debido a su carácter parcialmente autoincompatible, por lo que es recomendable la introducción de colmenas de abejas o abejorros en invernadero.

## 5.5. Uva de mesa (*Vitis vinifera* L.)

El mercado de uva de mesa exige un suministro continuo a lo largo de todo el año de fruta homogénea en calidad (color, forma, calibre, etc.) y con buena aptitud para la conservación. Los consumidores por su parte demandan una uva con buen aspecto externo y calidad gustativa (ausencia de semillas, buen sabor, color, firmeza, etc.) y obtenida con técnicas respetuosas con el medio ambiente. Por último, los productores deben satisfacer la demanda de comercializadores y consumidores de manera que su actividad agrícola resulte rentable.

En este contexto, con el cultivo protegido de uva de mesa se consigue adelantar y/o retrasar las producciones y ampliar el calendario de oferta, cubriendo los huecos en los que se obtienen los mejores precios y aumentar la producción en cantidad y calidad, al mejorar el microclima en el entorno del cultivo y reducir la presión de plagas y enfermedades y las pérdidas por condiciones meteorológicas adversas (lluvia, granizo, viento, etc.)

La uva de mesa comenzó a cultivarse bajo abrigo en Inglaterra y Francia. A mediados del siglo XIX se empezaron a comercializar en Inglaterra uvas procedentes de cultivo protegido. En la década de los 70 se realizaron en Japón los primeros estudios encaminados a lograr una doble cosecha anual de uva de mesa en invernadero. Desde entonces la técnica de forzado en uva de mesa se ha difundido notablemente. En Italia, todas las regiones productoras de uva de mesa han introducido esta innovación y en España, lo han hecho la Región de Murcia y Andalucía.

Los invernaderos usados para el cultivo de uva de mesa son tipo parral con cubierta multicapilla (*raspa* y *amagado*), cubiertos con malla o plástico. Este diseño, frente al parral plano, reduce el riesgo de colapso de la estructura ante una granizada, y con cubiertas plásticas, evita el rajado y las podredumbres de la uva provocadas por la caída del agua de lluvia en la zona de racimos y mejora la captación de luz. La estructura de estos invernaderos la conforman soportes de madera o acero galvanizado ligados entre sí por su parte superior por una estructura inclinada flexible ejecutada con una malla doble de alambres que a su vez sujeta los materiales de cerramiento. La altura máxima es de 3,5 m y en los laterales es de 2 m.

La cubierta plástica suele extenderse solamente por el techo, dejando el *amagado* de la estructura sin cubrir a modo de ventanas cenitales y las bandas abiertas para conseguir una adecuada ventilación y evitar un exceso de temperatura que puede afectar

al desarrollo del cultivo. El plástico comúnmente empleado es un film de polietileno (PE) térmico incoloro de 50,8 micras. La cubierta plástica, además, suele ser temporal y su fecha de colocación depende del objetivo. Si se pretende adelantar la cosecha<sup>2</sup> se coloca en enero, mientras que si lo que se quiere es retrasarla se instala a finales de agosto (envero) y puede emplearse un film de polietileno de mayor espesor que se recoge en los amagados tras la recolección y que sirve para varias campañas. Además la cubierta plástica se usa para disminuir problemas de cuajado en algunas variedades ('Sugraone').

Las variedades de uva que se cultivan en invernadero en España son en su mayoría apirenas tempranas como 'Sugraone' o 'Flame Seedless' y de media estación-tardías como 'Crimson Seedless' o 'Autumn Royal'. El sistema de conducción más empleado es el parral con el dosel de vegetación dispuesto en plano horizontal a 2 m aproximadamente del suelo. Los marcos de plantación suelen ser de 3,5 x 3,5 m, 3 x 4 m o 3 x 4,5 m (800 parras ha<sup>-1</sup>).

A nivel experimental, en la E.E. de la Fundación Cajamar hemos llevado a cabo ensayos para cultivar uva de mesa en invernadero plástico totalmente cerrado (Figura 8). El objetivo principal ha sido conseguir un adelanto de la cosecha más significativo que el logrado en cultivo semiforzado, para incrementar la rentabilidad. El cultivo en invernadero modifica notablemente la fenología y adelanta la recolección hasta un mes, sin ocasionar mermas en la cantidad y calidad de la cosecha. Sin embargo, estos resultados sólo son posibles con la aplicación de cianamida de hidrógeno (H<sub>2</sub>CN<sub>2</sub>). La cianamida se aplica a finales de diciembre a una dosis del 5 %. Ante la reciente prohibición de su uso en vid, serán necesarios productos alternativos que compensen la falta de frío invernal y favorezcan una más temprana, rápida y homogénea salida del reposo.



Figura 8. Cultivo de uva de mesa en invernadero cerrado

<sup>2</sup> Para adelantar la cosecha es necesario emplear un agente de ruptura del reposo invernal porque si no se produce una menor e irregular brotación por falta de frío. Tras la prohibición del uso de cianamida de hidrogeno, producto comúnmente usado por su efectividad para tal fin, los parraleros han retrasado la fecha de cubierta hasta finales de febrero-principios de marzo (yema hinchada). Como consecuencia, se pierde gran parte del adelanto.

La gestión del clima en el invernadero debe tener como premisas que la temperatura óptima para la brotación está en torno a 10 °C y que para el crecimiento y desarrollo de la vid se sitúa alrededor de los 25-30 °C. Por esta razón, la ventilación resulta de vital importancia en invernadero cerrado. La combinación de ventanas laterales y cenitales resulta determinante para ventilar dado que el dosel vegetal de este cultivo se dispone horizontalmente.

El significativo adelanto de la cosecha conseguido mediante el cultivo en invernadero plástico cerrado abre la posibilidad de obtener dos cosechas anuales, algo que hasta ahora sólo ha sido posible al aire libre en los trópicos.

Por último, en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar con la idea retrasar la maduración se ha estudiado el efecto de la combinación de diferentes técnicas de cultivo en 'Autumn Seedless'. Esta variedad apirena blanca, de buen tamaño de baya, sin grandes exigencias en técnicas específicas de cultivo, podría cubrir el hueco de mercado de fin de año. Las técnicas combinadas fueron: retrasar la fecha de poda, incrementar la carga, cubrir el invernadero con plástico en enero y embolsar los racimos. Se consiguió retrasar la maduración hasta 24 días.

El fenómeno de inversión térmica y la falta de luz durante los primeros estadios de desarrollo de los pámpanos (que en invernadero ocurre en enero-febrero) y las altas temperatura durante periodos críticos del cultivo son dificultades adicionales que pueden causar pérdida de fertilidad y pérdida de parte de la precocidad antes conseguida.

## 5.6. Melocotonero (*Prunus persica* L.)

El cultivo en invernadero del melocotonero permite acelerar el desarrollo y la maduración de los frutos y obtener así cosechas extratempranas que pueden alcanzar elevados precios en el mercado. Esto se consigue gracias al aumento de temperatura en el invernadero, siempre y cuando la temperatura en el exterior no sea óptima para el desarrollo de los frutos, como es el caso de las variedades de floración temprana. Con el cultivo en invernadero se adelanta la cosecha entre 20 y 60 días (finales de marzo y mayo), época en la que hay un hueco de mercado ya que aún no ha llegado la fruta



cultivada al aire libre en nuestro hemisferio y ya ha acabado la temporada en el hemisferio sur. Asimismo, el cultivo protegido mejora la calidad de los frutos protegiéndolos del viento, la lluvia y en algunos casos, de plagas y enfermedades.

El melocotonero, como especie de zonas templadas, requiere acumular una cantidad de frío para salir del reposo invernal. Por ello, la cobertura del cultivo hay que retrasarla hasta después de que se hayan satisfecho estas necesidades de frío. Para intentar acelerar la acumulación de frío invernal, y beneficiarse cuanto antes de las condiciones del invernadero, se pueden aplicar estrategias de riego deficitario o colocar mallas de sombreado en otoño, con el fin de anticipar la entrada en reposo del árbol, o aplicar riegos climatizantes, que reducen la temperatura de las yemas favoreciendo la acumulación de frío. Es conveniente controlar con sensores de temperatura el frío acumulado por las yemas, para cubrir el cultivo en cuanto se hayan satisfecho los requerimientos del cultivo y así anticipar al máximo la brotación. Asimismo se pueden aplicar productos químicos para acelerar la salida del reposo. Una vez cubierto el invernadero, si las temperaturas nocturnas bajan demasiado, la calefacción puede ser necesaria. Posteriormente, durante la floración y hasta después del cuajado del fruto hay que evitar temperaturas elevadas (>20-22 °C), que ocasionan caída de flores y frutos. Es muy importante, por tanto, la ventilación del invernadero. La cobertura plástica del cultivo sería por tanto temporal, manteniéndose desde la salida del reposo de las yemas hasta después de la cosecha.

Diferentes estructuras son posibles para este cultivo siendo las más comunes las utilizadas inicialmente para horticolas: p.e. invernaderos multitúnel, con una altura mínima en canaleta de 3 m y en cumbre de 5 m, con ventilación cenital y lateral (Figura 9). El plástico utilizado puede ser EVA o PE (tipo "Nectarine") (0,10-0,20 mm de espesor), con estabilizadores UV, que permiten que penetre la radiación UVA, esencial para promover la coloración roja de la piel del fruto. Tanto la estructura como el plástico deben permitir una fácil retracción de éste último tras la recolección.

Para este tipo de cultivo son apropiadas variedades con bajos requerimientos de horas-frío y con un rápido desarrollo del fruto, como por ejemplo, 'Springtime', 'Armgold', 'Maravilha', 'Flordaking', 'Flordastar' o 'San Pedro', o la variedad de nectarina 'Armking'. En este caso resultan



Figura 9. Cultivo protegido de melocotonero en invernadero multitúnel

interesantes las plantaciones de alta densidad para obtener elevadas cosechas que permitan una rápida recuperación de la mayor inversión del cultivo en invernadero. En Italia son frecuentes plantaciones de 1.000-1.500 plantas ha<sup>-1</sup> formadas en Ypsilon (4-4, 5 x 1,5-2 m). Mayores densidades de plantación permiten obtener mayores producciones pero se reduce el tamaño del fruto y se retrasa la maduración. Densidades en torno a 900 plantas ha<sup>-1</sup> formadas en “vaso español” también son adecuadas.

El control del tamaño de los árboles en invernadero es otro aspecto de gran importancia, en especial, si la densidad de plantación es media o alta. Diferentes técnicas se usan para ello: podas en verde, poda de raíces, riego deficitario controlado, aplicación de fitoreguladores (Paclobutrazol) o el uso de patrones enanizantes o semienanizantes.

Para mejorar la calidad de los frutos en melocotonero una técnica esencial es el aclareo de frutos. En condiciones de invernadero es necesario que sea realizado de forma precoz, debido al acortamiento del periodo de desarrollo del fruto de por sí ya más corto en las variedades tempranas. El aclareo químico, por su menor coste y su precocidad, estaría especialmente indicado, teniendo en cuenta que en invernadero se tiene menor riesgo de sobreaclareo debido a la menor incidencia de climatología adversa.

### 5.7. Cerezo (*Prunus avium* L.)

El cerezo es una especie próxima al melocotonero, por ello, tanto los objetivos como los condicionantes anteriores son válidos para este cultivo. La cereza es una de las primeras frutas de hueso que llega al mercado en primavera obteniendo unos elevados precios de venta, por lo que es, si cabe, de mayor interés aún el adelanto de 1-2 meses en cosecha que se puede conseguir en invernadero. Los requerimientos en frío suelen ser mayores que los del melocotonero de floración temprana, por lo que el cerezo suele cultivarse en zonas de inviernos más fríos donde, tras la salida del reposo puede ser más necesario el uso de calefacción para inducir una rápida brotación. El cultivo en invernadero del cerezo reduce además las pérdidas por rajado de frutos al evitar las lluvias en maduración, y las pérdidas debidas al ataque de pájaros.



Al igual que en melocotonero, en cerezo se pueden utilizar diferentes estructuras pero las más usuales son también los invernaderos multitúnel inicialmente diseñados para cultivos hortícolas, con altura media de 5 metros. Además de ventilación cenital y lateral, para controlar los excesos de temperatura y humedad durante la floración y el desarrollo del fruto, es casi siempre necesario un sistema de calefacción para mantener la temperatura en un nivel adecuado para acelerar la brotación y la floración.

La producción de cereza en invernadero también requiere de variedades precoces como podrían ser Marvin 4-70, Burlat, Brooks y Earlise. En el caso de variedades auto-incompatibles es imprescindible la instalación de más de una variedad y haber realizado un adecuado diseño de polinización. Asimismo, hay que asegurar la presencia de abejas durante la floración para optimizar la polinización y la producción, bien permitiéndoles el paso al invernadero o, lo que es mejor, instalando colmenas en su interior.

Los sistemas de formación más apropiados para el cerezo en invernadero son el sistema en V (4,5 x 0,6-1 m), o el vaso español (4-5 m x 2-3 m), que permiten altas densidades. En ambos casos es necesario un control del tamaño del árbol utilizando patrones enanizantes (p.e. los patrones de la serie 'Gisela', o Santa Lucia 64) y poda e incluso con la aplicación de retardantes del crecimiento.

## Referencias bibliográficas

- Caruso T. y Barone, E. (1993): "Aspetti e problemi della peschicoltura protetta"; *Rivista di Frutticoltura*, (4); pp. 43-53.
- Erez, A.; Yablowitz, Z.; Korcinski, R. y Zilberstaine, M. (2000): "Greenhouse-growing of stone fruits: effect of temperature on competing sinks"; *Acta Horticulturae*, (513); pp. 417-425.
- Galán Saúco, V. (2002): "Greenhouse Cultivation of Tropical Fruits"; *Acta Horticulturae*, (575); pp. 727-735.
- Galán Saúco, V. y Rodríguez, M. C. (2007): "Greenhouse Cultivation of Papaya"; *Acta Horticulturae*, (740); pp. 191-195.

- Galán Saúco, V.; Ait-Oubahou, A. y Abdelhaq, H. (2004): "Greenhouse Cultivation of Bananas"; *Cronica Horticulturae*, (44); pp. 35-37.
- Alonso, F.; Hueso, J.J ., González, M., Extremera, D. y Cuevas, J. (2005): "El fenómeno de latencia en el cv. de uva de mesa 'Flame Seedless'. Efectos compensatorios de la cianamida de hidrógeno en la producción bajo abrigo"; *Actas Portuguesas de Horticultura*, (6); pp. 338-343.
- Alonso, F.; Hueso, J. J., González, M.; Sacot, P. y Cuevas, J. (2007): "Efecto de distintas dosis de cianamida de hidrógeno sobre la brotación y fertilidad de la variedad de uva de mesa 'Flame Seedless' cultivada bajo plástico"; *Actas de Horticultura*, (48); pp. 174-177.
- Alonso, F.; Hueso, J. J.; Navarro, J. L. y Cuevas, J. (2003): "Efectos de la cobertura plástica sobre la precocidad del cultivar de uva de mesa apirena *Flame Seedless*"; en *Actas de Horticultura*, (39); pp. 444-446.
- Castilla, N. (2005): "Invernaderos de plástico"; *Tecnología y manejo*. Madrid, Mundiprensa.
- Perez Parra, J. J. (1998): "El invernadero parral: caracterización y evolución"; Perez Parra, J. y Cuadrado Gómez, I. M. (ed.): *Tecnología de invernaderos II*. Curso superior de especialización. Almería, Junta de Andalucía, FIAPA, Caja Rural de Almería; pp.179-192.
- Polat, A. A.; Durgac, C. y Caliskan, O. (2005): "Effect of protected cultivation on the precocity, yield and fruit quality in loquat"; *Scientia Horticulturae*, (104); pp. 189-198.

## ¿RESÍDUOS? PRODUCTOS CON OTRAS CALIDADES Y DISTINTAS APLICACIONES

Sevilla, A.; Domene, M. A.; Uceda, M.; Buendía, D.; Racero, J. L.  
Fundación Cajamar

### RESUMEN

La agricultura intensiva de invernadero funciona en un régimen parecido al de la producción industrial con un consumo constante de recursos varios, una producción regular de hortalizas y, como consecuencia, la formación de un producto de rechazo que incluye distintos materiales inorgánicos, tales como plásticos o metales y sobre todo una fracción orgánica que abarca las podas de plantas durante el cultivo, la planta cuando se arranca y hasta la parte de los frutos que no se haya comercializado. El listado de esas fracciones ha pasado de ser un residuo sin otro tratamiento que el traslado a vertedero al de un producto reciclable de forma que la práctica totalidad de los llamados residuos son ya parte de nuevos procesos que valorizan los rechazos y los devuelven al ciclo productivo en otro nivel. El artículo repasa el tipo de fracción que se genera en cada etapa y sintetiza las formas de revalorizar las distintas fracciones profundizando sobre la fracción orgánica y la solución a base del compostaje puesta en práctica en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar.

### SUMMARY

*Greenhouse intensive farming works in a regime similar to industrial production with a constant consumption of several resources, a regular production of vegetables and, therefore, the formation of a product of rejection comprising different inorganic materials such as plastics or metals and, above all, an organic fraction that includes the pruning of plants during cultivation, the plant when its useful life has ended and until the fruit is not marketed.*

*The list of these fractions has gone from being a waste without treatment other than transfer to landfill, to a recyclable product, so that almost all of these so-called wastes is already part of new processes that add value to the rejection and return to production cycle to another level.*

*The article reviews the type of fraction that is generated at each stage and summarizes the ways to revalue, deepening on the organic and compost-based solution implementation at the Experimental Station Cajamar Foundation.*

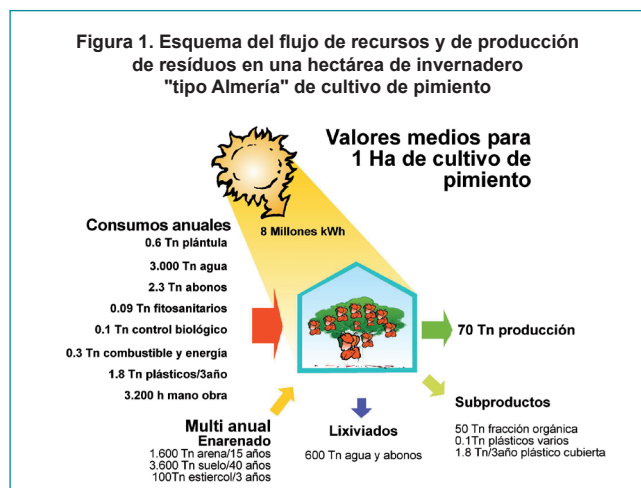
## 1. Desglose de los productos que genera un invernadero

La agricultura intensiva tiene un marco de trabajo asimilable al de un proceso industrial. Utiliza como materia prima un recurso renovable como es la radiación solar, otra serie de recursos naturales como el terreno y el agua y una cantidad de insumos (combustibles, abonos, fitosanitarios, plásticos, sustratos, etc.) para producir un producto de consumo que son las hortalizas, los frutos o las flores.

El proceso lleva aparejado la producción de residuos en forma líquida (lixiviados, restos de abonos y fitosanitarios), otra sólida no orgánica (bandejas, contenedores, sustratos, plásticos, tierra, pilas, material sanitario), y la fracción mas voluminosa que está compuesto por los restos orgánicos generados durante el crecimiento de la planta y el arranque de la cosecha.

A diferencia del proceso industrial, en este caso, el producto final puede pasar a ser parte del residuo. En función de cómo se desarrolle el cultivo, y cual sea la situación del mercado, se puede dar el caso de destruir parte o toda la producción aumentando de forma significativa el problema de la generación de residuos.

Si bien la Figura 1 da una idea global de lo que ocurre en un invernadero dedicado al cultivo del pimiento, a la hora de enmarcar la gestión de los residuos hay que llegar al detalle del día a día, ya que la acepción general de plástico o materia orgánica esconde tanta diversidad que varios productos del mismo capítulo pueden ser distintos, tanto en su composición química, como en su estado de degradación y necesitar, por tanto, soluciones muy diferenciadas.



**Tabla 1. Tipos de residuos producidos en un invernadero**

	Tipo de residuo	Comentario
Vegetal	Fruto de destrío	Reciclable, problemas de frecuencia y composición
	Destalle	Reciclable
	Resto vegetal de fin de campaña	Reciclable con problemas por llevar envuelto varias fracciones
Plásticos en lámina	Film plástico de cubierta	Reciclable
	Malla antiinsectos	Reciclable
	Malla de sombreo	Reciclable
	Atado de rafia	Reciclable con problemas de manejo
Plásticos en envase	Envases plástico fitosanitarios	Reciclable.
	Envases plásticos abonos	Reciclable
	Sacos plástico	Reciclable
Tuberías de riego	Goteros	Reciclable
Substrato	Fibra de vidrio	Difícilmente reciclable
	Fibra de coco	Reciclable
	Perlita	Difícilmente reciclable
Soportes plásticos de plantas	Bandejas poliestireno	Reciclable
	Bandejas de plantas	Reciclable
	Macetas	Reciclable
Varios	Alambres	Reciclable
	Pales de madera	Reciclable
	Trampas contra insectos	Reciclable
	Colmenas de polinización	Reciclable

Otro filtro que hay que usar a la hora de evaluar el residuo es el nivel de calidad o de contaminación con el que se recoge. En el apartado más voluminoso, que es el vegetal, encontramos situaciones bien diferenciadas. La poda de la planta que se hace durante el crecimiento (destalle) produce un material tierno y sin ningún tipo de contaminación que es distinto al generado durante el arranque del cultivo. En el primer caso, además de mucha mayor calidad se da una frecuencia y una cantidad más o menos constante durante el ciclo. En el segundo caso, el residuo se genera de una vez en un tiempo de días.

En el capítulo de plásticos la inmensa mayoría se corresponde con el plástico de cubierta que es polietileno y se retira una vez cada dos o tres años. Pero otros plásticos como la rafia de entutorado, los envases de abonos, los sacos o las bandejas se consumen a un ritmo anual. La composición química de estos últimos, suele ser distinta a la del plástico de cubierta y suele contener trazas de otros productos químicos.

## 2. El modelo de gestión en vigor

El residuo agrícola está englobado en el capítulo genérico de residuo urbano y pasa a ser responsabilidad de los Ayuntamientos tanto en lo que afecta a su recogida como al tratamiento que se canaliza por dos caminos distintos.

Aquellos municipios en los que la actividad agrícola intensiva (invernaderos) es minoritaria, dejan la gestión en manos de terceros que procesan aquellas fracciones que tengan salida de mercado y dejan el resto en manos del propio agricultor, que sigue entonces el camino de la incineración o el vertido en lugares preparados cuando las cooperativas o los ayuntamientos organizan alguna solución.

En aquellos ayuntamientos en los que los invernaderos tienen una incidencia significativa, el tratamiento no se dispersa y es el propio consistorio el que se encarga de la gestión, ya que previamente ha promulgado edictos y asignado tasas como las de las basuras domésticas a cada propietario de invernadero.

En este último supuesto, el Ayuntamiento suele ceder a una empresa privada la gestión y esta actúa con un perfil similar al de las empresas de tratamiento de residuos sólidos urbanos; es decir disponen de sus propios contenedores, camiones de recogida, planta de acopio, procesado y, en su caso, recuperación y valorización de las distintas fracciones.

El modelo de gestión y la eficacia de este último tipo de empresa es muy heterogéneo, probablemente porque hay pocas empresas y porque el marco de trabajo al que deben dar servicio es muy dispar. No es lo mismo el tipo de fracción y la frecuencia de la zona de cultivo fresero de Huelva que la del cultivo hortofrutícola de Almería o la producción de flores del Maresme en Cataluña.

En el caso de Almería, que es el de más entidad, existen dos modelos de empresas gestoras que cubren la totalidad de la zona productiva de la costa. Una de ellas está participada por el propio Ayuntamiento y se encarga de la gestión exclusiva de los residuos agrícolas que se generan en el término municipal de la capital.

La otra es de carácter privado y canaliza la gestión a través de una concesión de un consorcio de Ayuntamientos dentro de los que están el resto de municipios en los que se genera la actividad hortofrutícola de Almería.

Del análisis de ambas soluciones se deduce que la recogida centralizada está resuelta con más eficacia que lo que es el tratamiento propiamente dicho. En parte debido a lo voluminoso de la fracción orgánica y a las enormes diferencias que se dan tanto en la composición (plantas con más o menos contenido de agua, frutos, etc.) como en su calidad (producto recién cortado o almacenado durante semanas y en estado de fermentación) y en la frecuencia de producción (mantenimiento durante la recolección, arranque al final de la campaña y todo ello diferenciado para el tipo de producción).

La fracción no orgánica es también diversa, pero tiene más homogeneidad. Los tipos de plásticos de cubierta o de envases son más previsibles y los restos de substratos se reducen a dos o tres componentes y se generan después de varias campañas de uso.

En este contexto, las empresas abordan el problema de la gestión con las miras puestas en la solución prioritaria al tratamiento de la fracción orgánica, en la valorización de las fracciones para las que existe mercado y la inertización y disposición en vertedero autorizado del resto de los componentes.

La efectividad del sistema se puede resumir diciendo que la fracción orgánica tiene tanto volumen y tanta dispersión que es imposible garantizar un tratamiento en línea. Implica que siempre hay una cantidad acumulada pendiente de tratamiento y que el producto tratado no se distribuye con la misma velocidad que se genera y también acumula excedentes.

La fracción plástica (cubierta y envases) sí se procesa en línea, de forma que todo lo que llega suele salir procesado para su posterior valorización. Los substratos se valorizan de forma más difusa, en su mayor parte se inertizan y depositan en vertedero.

### 3. Un marco teórico para reutilizar los subproductos

Los productos que entran a formar parte del ciclo del invernadero salen con otras propiedades y calidades que, si bien los retrae de volver a su uso inicial, no así de cualquier otro que pueda necesitar una calidad menos exigente. El estudio siguiente enmarca tanto el problema del producto como los nuevos usos posibles.



## 3.1. Plásticos

### 3.1.1. Rafia

La rafia es una cinta de polipropileno utilizada de forma universal para sustentar las plantas que crecen en altura y que no tienen resistencia natural para mantener la producción de frutos. La cualidad por la que se ha extendido su uso es la de la resistencia a la rotura.

Sin embargo, la radiación ultravioleta afecta de forma severa esta propiedad, lo que limita la opción del reciclaje para producir un producto con el mismo fin. Ahora bien, el polipropileno es un plástico con unas propiedades muy estudiadas como atrayentes de ciertos hidrocarburos o como refuerzo estructural de composites y en ese caso, el valor del producto es en el estado de microfibra lo que reduce el problema que genera la degradación de la rafia ya utilizada.

Entre las aplicaciones que han pasado a la fase de ensayos de laboratorio ya se puede mencionar el de la fabricación de aditivos para añadir al hormigón y mejorar algunas de sus propiedades, la fabricación de barreras de absorción y contención de derrames de crudo o la formulación de mezclas asfálticas en frío. En condiciones normales, esta solución para la pavimentación es una opción más barata pero de menos calidad que el proceso a alta temperatura. Sin embargo algunas pruebas en las que se añadía fibra de polipropileno a la mezcla en frío han mejorado las prestaciones de la misma.

El uso habitual de la rafia recuperada en cualquiera de las aplicaciones industriales tiene que pasar por disponer de un producto más limpio del que se dispone en la actualidad. Cuando el agricultor retira el cultivo, arranca la mata enredada en la rafia generando un producto híbrido entre rafia y materia orgánica inútil tanto si el uso se orienta hacia la aplicación de la rafia, como si se hace hacia el uso de la planta.

### 3.1.2. Macetas

Las macetas suelen estar fabricadas en polipropileno que tiene un discurso parecido al de la rafia salvo por el hecho de que no se presenta en cintas sino en láminas. La diferencia es importante por que la estructura en forma de cinta es muy compleja de procesar. Se suele enredar en todos los sistemas de corte o en los ejes y es habitual que termine parando maquinaria de lo mas poderosa.

Las macetas son por el contrario una forma con que tiene una trituración fácil y que permite sacar granza de polipropileno tan fina como se quiera. Una vez lavada y desinfectada, la granza se reutiliza para fabricar escobas, macetas, soportes de bicicletas y multitud de productos plásticos.

### 3.1.3. Plástico de cubierta

En su totalidad, el plástico es polietileno con aditivos para reducir la degradación de la radiación ultravioleta y alargar la vida útil. El polietileno se retira del invernadero cada dos o tres años y lleva su composición original más las trazas de los componentes químicos que se hubiesen aplicado durante el cultivo y que se hayan depositado en la parte interior, más los restos de la pintura blanca utilizada de forma general en verano como sistema de sombreado (blanqueo).

El lavado de estos plásticos no tiene ninguna dificultad y el producto resultante se pica hasta conseguir una granza de polietileno de similares características a la granza con la que se produce el material original.

La granza de polietileno reciclado se utiliza de forma generalizada en la producción de muchos de los plásticos de polietileno que no tienen un uso alimentario como contenedores, ruedas, vallados de jardinería o conglomerados.

## 3.2. Metales

Terminada la vida útil de al rededor de quince años, la estructura del invernadero que es en su inmensa mayoría un perfil redondo o cuadrado de acero galvanizado en caliente, se recicla en su totalidad como chatarra y vuelve al ciclo de la producción del acero.

## 3.3. Incineración

La mejor situación que podemos esperar es la de reintroducir el plástico o el producto orgánico en otro proceso que genere un producto de interés y evite el consumo de materias primas.

Pero aún en el contexto de ese modelo óptimo, una parte de esas fracciones no podrá procesarse y pasará a ser un residuo. Los plásticos usados en todos los envases y la rafia son derivados del petróleo y por tanto un combustible con muy buenas propiedades cuando se usa de forma aislada. Mejoran las condiciones de ciertas mezclas cuando se añaden a otra materia orgánica también empobrecida.

En un caso u otro, la incineración tiene la ventaja substancial de producir electricidad pero la contrapartida de ser un foco potencial de emisiones nocivas. Todos los productos plásticos de desecho tienen algún tipo de contaminación, así que la incineración se tiene que plantear bajo las máximas medidas de control.

Afortunadamente, tanto la incineración como la gasificación, son procesos muy avanzados y se tiene que aceptar que es del todo posible realizar la separación y limpieza del producto de forma previa al igual que la del control del hogar y limpieza de los gases de escape con total garantía.

La lista de países que han adoptado la incineración como práctica habitual de gestión de los productos agrícolas incluye a la mayoría del llamado núcleo Europeo. Holanda, Francia o Alemania, por ejemplo, usan la incineración tanto para la gestión de los residuos sólidos urbanos como para los agrícolas.

## 4. El caso práctico de la fracción orgánica: producción de compost

### 4.1. Introducción al proceso de compostaje

La definición más aceptada de compostaje es la “descomposición biológica aeróbica de residuos orgánicos de distinta procedencia bajo condiciones controladas en un estado en el que se puede manejar, almacenar y aplicar con sencillez y seguridad al terreno sin afectar adversamente al medio ambiente.

Se denomina descomposición y no estabilización porque no siempre se puede asegurar que la estabilización de la materia orgánica sea total. Se dice que la descomposición es de tipo biológico-microbiológico para diferenciarla de las descomposiciones físicas y químicas. Se indica que es aeróbica porque permite el acceso de oxígeno al material en descomposición.

Por todo lo anterior se continúa que, el proceso:

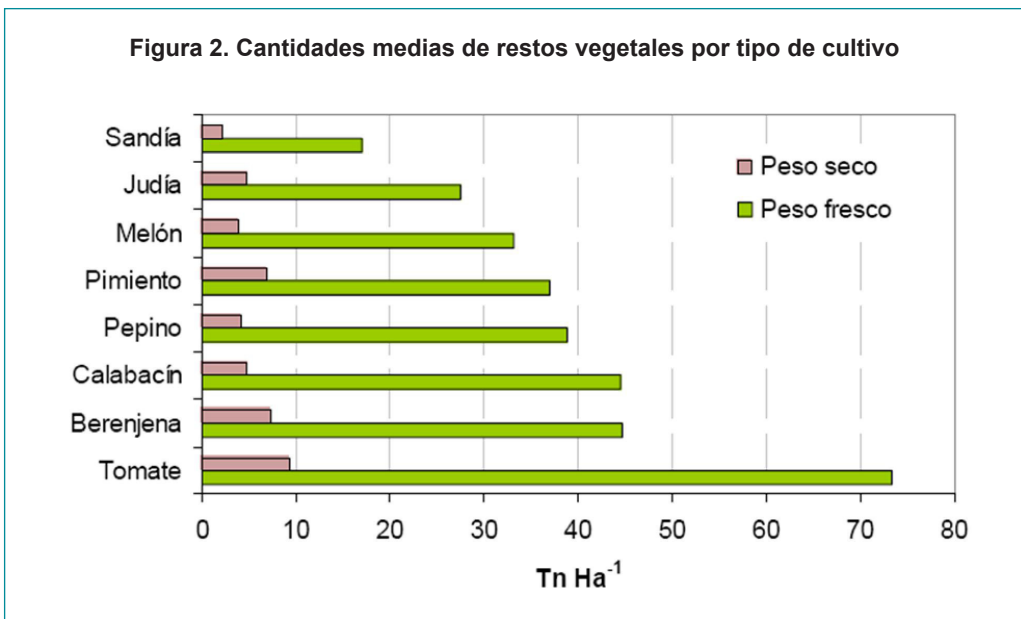
- Es biooxidativo, por tanto biológico, lo que diferencia al compostaje de otros tratamientos de tipo físico o químico, desarrollándose una actividad eminentemente aeróbica.
- Es controlado, lo que indica la necesidad de una monitorización y control de parámetros durante el desarrollo del mismo, diferenciándolo de los procesos naturales no controlados. los parámetros a controlar son, la temperatura, la humedad y oxigenación.
- Tiene lugar sobre sustratos orgánicos en fase sólida, generalmente heterogéneos, que actúan como soporte físico y matriz de intercambio, así como fuente de nutrientes y agua necesarios para el metabolismo microbiano, aportan microorganismos endógenos, retienen los residuos metabólicos generados durante su desarrollo y actúa como aislante térmico del sistema

En principio cualquier material orgánico es susceptible de compostarse. Podemos tener restos de cultivos hortícolas, restos de poda tanto de frutales como de jardinería, subproductos de manipulación y de elaboración de cosechas e incluso podríamos considerar los residuos generados en industrias agrarias diversas como almazaras, bodegas, etc.

## 4.2. Tipo de residuo de un cultivo, frecuencias, cantidades, calidades o problemas

La cantidad de resto vegetal que produce un invernadero está ligada al producto cultivado y a las rotaciones que se apliquen en la campaña.

De acuerdo a los datos del equipo de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, la estrategia del agricultor medio es cortar la planta de raíz y dejarla secar algún tiempo de forma que la humedad inicial se reduzca a casi la mitad. Los extremos posibles entre la máxima humedad en el momento de la retirada del invernadero y el secado de la planta en estufa indican un margen muy importante en peso.



El calendario para la generación de los residuos está ligado a los ciclos de producción de los diferentes cultivos. Los cultivos de tomate, pimiento y berenjena se consideran de ciclo largo, mientras que los cultivos de pepino, calabacín, judía verde, melón y sandía son cultivos de ciclo corto. En caso de cultivar especies de ciclo corto en invernadero es común la práctica de llevar a cabo rotaciones en la misma campaña, de éstas son representativas la rotación pimiento-sandía, pimiento-melón, pepino-sandía y pepino-melón.

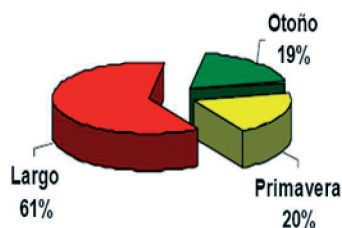


Figura 3. Distribución temporal de los desechos de cultivo

El proceso de cultivo produce desechos durante todo el año en forma de destalles, deshojes o eliminación de frutos de destrío y con picos en Enero-Febrero, y Mayo-Junio. El primer pico corresponde con el final de los cultivos de otoño (judía, calabacín y pepino principalmente) y supone un 19 % de los residuos vegetales. En Mayo-Junio coincide con la finalización de los cultivos de primavera (melón y sandía principalmente) y los cultivos de ciclo largo o únicos como el tomate, pimiento y berenjena, representando el 81 % de los residuos (61 % de los cultivos de ciclo largo y 20 % de los de primavera).

### 4.3. Soluciones para realizar el compostaje

El compostaje en contenedor es aquel sistema en el que la materia orgánica que se desea compostar se introduce en un contenedor, silo o recipiente similar capaz de homogeneizar las condiciones necesarias de humedad, aireación y mezcla de los componentes.

En los sistemas confinados, el proceso de compostaje se puede mantener controlado: se mantienen las condiciones aeróbicas en valores óptimos, se gestiona mejor la temperatura de la pila, se recuperan los lixiviados, se regula la humedad y en último extremo se pueden canalizar los gases que se emiten eliminando aquellos que generan malos olores y, en su caso, confinando el CO<sub>2</sub> para evitar su dispersión a la atmósfera.

Normalmente, estos sistemas se asocian al uso de unos cilindros rotatorios diseñados para que el material entre por una de las bocas y vaya avanzando hacia la de la salida a un ritmo tal que se sea justo el que necesita la fase termófila para desarrollar la primera etapa del compostaje.

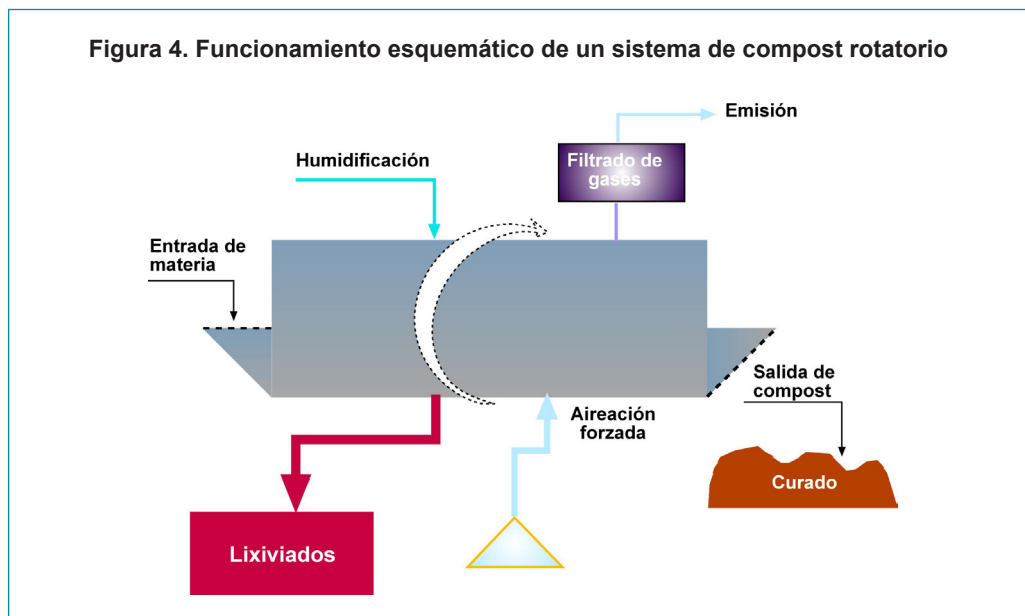
En su avance a través del cilindro, el material va rotando lo que hace que se oxigene y se mezcle. Al estar confinado la humedad no se pierde y se puede garantizar que todo el volumen a compostar se mantiene en idénticas condiciones. Como el cilindro puede estar aislado térmicamente o ubicado en el interior de un edificio, el clima exterior no le afecta de forma directa y el proceso de compostaje se acelera hasta el máximo que

permite la biología del sistema. Adicionalmente, el producto sale mucho más mezclado y con ello más homogeneizado que el conseguido de forma tradicional y se puede plantear la gestión de un volumen enorme de forma continuada y produciendo compost en tiempos conocidos y con calidades bien controladas.

Las ventajas de este proceso hay que compensarlas con su penalización económica. Es un proceso que necesita un capital inicial relevante, que consume energía y con un coste de operación y mantenimiento a considerar.

Los sistemas de compostaje confinados se van abriendo camino sobre todo cuando el problema que se quiere gestionar es muy complejo y de mucho volumen. Existen sistemas diseñados para gestionar todo el residuo sólido de toda una ciudad (Edmonton, Canadá), o de hospitales y centros sociales, por poner ejemplos de entornos en los que la eficacia tiene que estar por encima de otras consideraciones.

Pero la historia del compostaje se ha hecho a base de la gestión de pilas al aire libre con unos requisitos tecnológicos más que moderados. Una vez troceado o preparado el material a compostar, el sistema no hace otra cosa que apilar el material en una forma de toblorone de unos dos metros en la base por uno o dos metros de altura.



Con esta geometría se puede usar maquinaria tipo tractores que pasan por encima de las pilas y las pueden voltear para airearlas o regar para mantener la humedad. Una vez se forma la pila, el gestor tiene que tener en cuenta que habrá que mantenerla por un periodo de entre cuatro y ocho meses, por lo que la simplicidad de este sistema se compensa con la necesidad de terreno. No sólo las pilas ocupan espacio sino que si se tienen que voltear el material pasa de un sitio a otro y la maquinaria que tiene que circular necesita de una red de accesos nada despreciables.

El control de la humedad necesario se puede hacer sólo a base de regar la pila en el caso de que se quede seca, pero si en un momento dado se presenta una lluvia que paraliza el proceso de compostaje, el modelo al aire libre no tiene forma de controlarlo. La falta de control sobre la humedad y sobre el oxígeno, hace que el proceso sea más lento y que se consiga menos homogeneidad. En una pila, los productos se van descomponiendo poco a poco pero difícilmente se van mezclando entre ellos y mientras el interior de la pila consigue mantener unas condiciones óptimas, los bordes no. Al no poder mezclar el material, el proceso del compostaje no se realiza por igual en todo el volumen de la pila.

Estas incertidumbres han formado parte de la discusión sobre el compostaje y en ese marco el proceso se ha desarrollado a lo largo de las pasadas tres o cuatro décadas y ha conseguido alcanzar los niveles de calidad exigidos tanto por los usuarios de abono orgánico como por las autoridades, que deben velar por que los productos cumplan con normas de calidad e higiene.

#### 4.4. Ejemplos

Existen muchísimos ejemplos de compostaje a pequeña escala y otros muchos de plantas de compostaje a gran escala. La mayoría se alimentan de una mezcla de residuo sólido urbano, de restos de granjas o de la fracción doméstica. Instalaciones que se dediquen a gestionar el residuo de la agricultura intensiva de los invernaderos son menos frecuentes, pero hay agricultores que compostan su propio residuo a la vez que plantas que centralizan la labor de toda una zona.



El ejemplo que presentamos es el desarrollado por la Fundación Cajamar y lo hacemos tanto por la cercanía como por que está diseñado para acometer la gestión de los residuos que se pueden producir en una explotación de entre una y dos hectáreas.

El modelo de compostera rotativa utiliza un cilindro de 3 m de longitud y 1 m de diámetro con una carga inicial de unos 200 Kg. El cilindro tiene unas palas en el interior y un motor accionado por energía solar que lo hace girar a una velocidad de 1rpm.

La compostera se carga hasta su límite de capacidad, se equilibra la relación carbono/nitrógeno añadiendo serrín y se añade un poco de agua en una cantidad que fija el estado de la materia en su inicio. Productos como el tomate suelen estar más verdes y húmedos que el pimiento o la berenjena que son más leñosos y dan un aspecto mas seco a la masa.

Una vez arranca el proceso de compostaje, la masa alcanza una temperatura de entre 60 y 70 °C y disminuye el volumen, de forma que para garantizar que no se pare el proceso, se añade mas materia a un ritmo de una vez por semana durante las dos o tres semanas siguientes a haber comenzado la fase termófila.

El motor se pone en marcha durante las horas centrales del día durante las primeras etapas y una vez el compost ya se ha enfriado, se para y se usa para voltear la masa una vez o dos a la semana.

Al cabo de cuatro o seis semanas del comienzo, la pila baja su temperatura a unos 40 °C y entonces la masa se saca de la compostera y se apila. El ciclo de la compostera comienza de nuevo y a lo largo de una campaña se repite el proceso de entre tres a seis veces apilando en el mismo sitio todas las extracciones de la compostera y dejando que el material madure.



Figura 5. Compostera rotativa diseñada por la Fundación Cajamar

La ventaja de este equipo frente a la pila es la de poder hacer compost con relativamente poca cantidad de producto, lo que lo habilita para fincas pequeñas, o para gestionar el compost durante la época del destalle o el aclareo, cuando una explotación produce de forma continua pero en poca cantidad.

El compostaje de una finca grande, incluyendo la fracción de retirada del cultivo a final de campaña, se ha llevado a cabo por primera vez en el año 2010 en pila estática. La razón más evidente es que en cuestión de semanas, una finca produce muchas decenas de toneladas de materia orgánica con una vida útil para poder hacer un buen compost de no más de dos semanas lo que induce a usar una pila estática porque es un sistema rápido que puede gestionar de forma económica mucho volumen.

Para garantizar la calidad y rapidez del compost, procedemos a triturar la masa vegetal con un rotovator acoplado a un tractor. En ese proceso el volumen disminuye en cerca de un 70 % lo que permite preparar pilas de alrededor de 2 x 3 m con una altura inicial de 1,5 m. Al igual que en el caso de la compostera rotativa, la pila se equilibra con serrín, restos de papel o de hojas para fijar la cantidad apropiada de carbono y se riega.

**Figura 6. Progreso del compostaje en pila realizado en el verano del año 2011**



A diferencia del sistema en la compostera, la pila pierde humedad de forma más rápida y hay que mantener la humedad con riegos muy habituales durante la fase termófila. En nuestro caso, las pilas de compost están en un cobertizo que tiene un sistema de riego por aspersion automatizado que en verano se activa casi a diario.

A diferencia de la experiencia con la compostera rotativa, la gestión en pilas ha permitido tratar todo el residuo producido por las mas de 4 Ha de cultivo que dispone la Estación Experimental de forma que se empezó a recoger material en el mes de mayo y se concluyó en junio, con la retirada de los últimos cultivos.

#### 4.5. Formas de medir la calidad y lo apropiado del producto

Los requerimientos de calidad del compost están dirigidos a conseguir: aspecto y olor aceptables; higienización correcta; impurezas y contaminantes a nivel de trazas; nivel conocido de componentes agrónomicamente útiles y características homogéneas y uniformes que permitan el almacenamiento sin experimentar alteraciones posteriores. Los organismos reguladores no tienen tanta sintonía como lo puedan tener los que regulan el tráfico y no hay una sola definición universal mas allá de los aspectos relacionados con la garantía de salubridad.

Dando por sentado que el control de patógenos se ajusta, por lo menos, al Real Decreto 824/2005 de 8 de julio sobre productos fertilizantes; Orden APA/863/2008, de 25 de marzo (*Salmonella: Ausente/25g producto, Escherichia coli: < 1000 NMP/g producto, Aquellos contenidos en el RD 2071/1993 de 26 nov en la Ley 43/02 de Sanidad Vegetal y en la Orden 776/02 del MAPA*), las medidas de calidad presentadas en la siguiente tabla son una síntesis de los requisitos publicados por algunas de las asociaciones internacionales dedicadas al compost o por los consiguientes organismos reguladores dedicados en exclusiva al compostaje.

En general las medidas se agrupan en tres tipos de parámetros:

PARAMETRO	VALOR IDEAL	COMENTARIO
<b>Físicos</b>		
Distribución del tamaño de partículas	Pasa el tamiz 8 mm	
Densidad aparente	600 Kg/m <sup>3</sup>	Puede oscilar un 25 % según sea el producto inicial o el estado de madurez.
Material inerte	< 8 %	Puede incluir hasta: • 5 % de piedra/arena • 3 % de plástico y metales
% Humedad	40–50 %	Siempre mayor al 30 %, incluso en Compost muy maduros.
<b>Químicos</b>		
pH	6,8–8	Condicionado por el material de origen. Suele ser básico si se trata de hojas y más ácido si lo mezclamos con estiércol.
Conductividad eléctrica	3,5–6,4 mS/m	Indica la cantidad de sales solubles. Entre las que se encuentran cloruros y sulfatos que son perjudiciales para las plantas. El límite óptimo lo fijará el uso al que se destine. Plantas delicadas o de semilleros no aceptan valores superiores a 2,5 mientras que muchas otras prosperan con valores de 6.
C/N	10–14 %	
% materia orgánica	35–70 %	
<b>% A. Húmicos</b>		
% N (total)	1–2,5 %	Es la suma del nitrógeno inorgánico en forma de nitratos y del orgánico incrustado en los organismos presentes. No todo es directamente asimilable por las plantas.
% P (P2O5)	1,5 – 2 %	
% K	1,5	
% Ca	2	
% Mg	1 – 1,3 %	
<b>Metales pesados (mg/kg de suelo)</b>		
Arsénico	41	Muchas plantas pueden ser tolerantes a los metales pesados, por lo tanto, los límites se establecen tanto para evitar los problemas en la planta como para evitar su transmisión a la cadena alimentaria. Estos valores pueden reducirse si el material de origen es rico en alguno de estos elementos.
Cadmio	2	
Cobre	300	
Níquel	90	
Plomo	150	
Zinc	500	
Mercurio	1,5	
Selenio	100	
Cromo (total )	250	
<b>Biológicos (UFC/g)</b>		
Bacterias totales	133·10 <sup>7</sup>	
Actinomicetos	41·10 <sup>4</sup>	
Hongos	48·10 <sup>3</sup>	
Nematodos	Ausentes	
Índice de madurez	> 95 % germinación	De los distintos sistemas de medida mencionamos la germinación de semillas (rábano o césped).

## Referencias bibliográfica

- Allen, E. R. y Ming, D. W. (1995): "Recent progress in the use of natural zeolites in agronomy and horticulture"; Ming, D. W. y Mumpton, F. A. (eds.): *Natural Zeolites'93 Occurrence, Properties, Use*. Int'l Comm Natural Zeolites, Brockport, New York; pp. 477-490.
- Barbarick, K. A. y Pirela, H. J. (1984): "Agronomic and horticultural uses of zeolites: A review"; Pond, W. G. y Mumpton, F. A. (eds.): *Zeo-Agriculture: Use of Natural Zeolites in Agriculture and Aquaculture*. Westview Press, Boulder, Colorado; pp. 93-103.
- BOE 131/1998. 12731. "Orden de 28 de mayo de 1998 sobre fertilizantes y afines"; pp. 18.028-18.078.
- Bremner, J. M. y Mulvaney, C. S. (1982): "Nitrogen total"; *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, page, A. L. et al. (eds.): *American Society of Agronomy*, Inc Madison, Wisconsin; pp. 595-624.
- Brown, K. H.; Bouwkamp, J. C. y Gouin, F. R. (1998): "The influence of C:P ratio on the biological degradation of municipal solid waste"; *Compost Science and Utilization*, 6(1); pp. 53-58.
- Dickson, N.; Richard, T. L. y Kozlowski, R. E. (1991): "Composting to Reduce the Waste Stream: A Guide to Small Scale Food and Yard Waste Composting"; *Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES)*, Ithaca, New York.
- Federación Agroalimentaria de CCOO (2000): "Formación para valoración de residuos agrícolas"; p. 75.
- Fistein, M. S. y Hogan, J. A. (1993): "Integration of composting process microbiology, facility structure and decision-making"; Hoitink, H. A. J. y Keener, H. M. (eds.): *Science and Engineering of Compositing: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. Renaissance Publications. Ohio.
- Golueke, C. G. (1977): "Biological Reclamation of Solid Wstes"; Rodale Press, Emmaus, Pennsylvania; p.9.

- Hamoda, M. F.; Abu Qdais, H. A. y Newham, J. (1998): "Evaluation of municipal solid waste composting Kinetics"; *Resources, Conservation and Recycling*, (23); pp. 209-223.
- Inbar, Y.; Chen, Y. y Hoitink, H. A. J. (1993): "Properties for establishing standards for utilization of compost in container media"; Hoitink, H. A. J. y Keener, H. M. (eds.): *Science and Engineering of Composting: Design, Microbiological and Utilization Aspects*. Renaissance Publications, Wothington, Ohio: pp. 668-694.
- Kayhanian, M. & G. Tchobanoglous. 1993. Characteristics of humus produced from the anaerobic composting of the biodegradable organic fraction of municipal solid waste. *Environmental Technology*, (14); pp. 815-829.
- Keener, H. M.; Marugg, C.; Hansen, R. C. y Hoitink, H. A. J. (1993): "Optimizing the efficiency of the composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects"; (eds.): Harry, A.; Hoitink, J. y Keener, H. M. Renaissance Publications. Ohio.
- Leggo, P. J. (2000): "An investigation of plant growth in an organo-zeolitic substrate and its ecological significance"; *Plant and Soil*, (219); pp.135-146.
- Madrid, F.; Lopez, R.; Cabrera, F. y Murillo, J. M. (2001): "Caracterización de los compost de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarrasa (Huelva)"; *Investigación Agr.: Prod. Prot. Veg.*, 16(1); pp. 105-117.
- Mathur, S. P. (1991): "Composting processes"; Martin, A. M. (eds.): *Bioconversion of waste materials to industrial products*. Elsevier Applied Science, New York; pp. 147-183.
- McGaughey, P. H. y Gotass, H. B. (1973): "Stabilisation of municipal refuse by composting"; *American Society of Civil Engineers Transactions. Proceedings-Separate*, 302(2767); p.897-920.
- Minato, H. (1968): "Characteristics and uses of natural zeolites"; *Koatsugasu*, (5); pp. 536-547.

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (1986): "Métodos Oficiales de Análisis"; Vol. III. Madrid.
- Morisaki, N.; Phae, C. G.; NakasaKi, K.; Shoda, M. y Kubota, H. (1989): "Nitrogen transformation during thermophilic composting"; *Journal of Fermentation and Bioengineering*, (1); pp. 57-61.
- Pérez-Parra, J. J. y Céspedes López, A. J. (2001): "Análisis de la demanda de inputs para la producción en le sector de cultivos protegidos de Almería"; *Estudio de la demanda de inputs auxiliares: producción y manipulación en el sistema productivo agrícola almeriense*. Fundación para la Investigación Agraria de la Provincia de Almería (FIAPA), Almería; pp. 1-102.
- Richard, T. L. (1992): "Municipal solid waste composting: physical and biological processing"; *Biomass and Bioenergy*, 3(3-4); pp. 163-180.
- Sullivan, D. M. y Millar, R. O. (2005): "Propiedades cualitativas, medición y variabilidad de los compost"; *Utilización de Compost en los Sistemas de Cultivo Hortícola*. Ediciones Mundi Prensa; pp. 95-119.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1992): "Sampling procedures and analytical methods"; *Environmental Regulations and Technology. Control of Pathogens and vector Attraction in Sewage Sludge*. EPA/626/R-95/013. USEPA, Office of Research and Development, Washington, D.C.; pp. 41-47.

## ENERGÍAS RENOVABLES EN LOS INVERNADEROS

*Manuel Pérez García y Jorge Antonio Sánchez Molina  
Universidad de Almería*

### RESUMEN

Los invernaderos son sistemas productivos caracterizados por un aprovechamiento intensivo y eficaz de los recursos primarios. De forma adicional y fuera de lo que son los procesos favorecidos por su propia configuración estructural como los relacionados con el acondicionamiento climático interior y la aportación de radiación fotosintéticamente activa a las plantas, es posible realizar en los mismos contribuciones relevantes de energía procedente de fuentes de tipo renovable, ayudando de esta manera a reducir la dependencia externa propia de las fuentes fósiles, a incrementar el valor añadido de la producción hortícola y, en contextos de intercambio de energía con las redes de distribución favorables, obtener un beneficio económico procedente bien de una tarifa bonificada o bien, y más deseable, de la reducción de aportaciones externas de energía. En este capítulo se realiza una revisión de las tecnologías renovables disponibles para su uso en los invernaderos y de las experiencias y expectativas planteadas en función de los distintos programas de implantación existentes.

### SUMMARY

*Greenhouses are productive systems characterized by an intensive and efficient use of primary resources. Additionally and out of what are the processes involved in its configuration and function related to indoor climate conditioning and the contribution of photosynthetically active radiation for plants, it can done important contributions of energy from renewable sources , thereby helping to reduce external dependence of fossil fuel, increasing the added value of horticultural production and, eventually, economic benefit of electricity selling. In this chapter we review the available renewable technologies suitable for their use in greenhouses and the experiences and expectations expressed in terms of the different existing implementation programs.*



## 1. Introducción

Las fuentes renovables de energía constituyen, en sus diversas modalidades y aplicaciones, una de las alternativas más abordables al actual modelo de transformación de energía primaria, caracterizado por su alto impacto ambiental y por el tamaño finito de las reservas de tipo convencional. El sol, el viento o la biomasa no fosilizada garantizan una aportación ilimitada y sostenible de energía que, si bien en términos económicos y funcionales aún precisa de algunos avances específicos, permite cubrir demandas completas o fracciones elevadas de las mismas en multitud de aplicaciones, así como está permitiendo contar en los últimos años con elevados porcentajes de participación eólica y solar en el mix de generación eléctrica nacional.

La agricultura es uno de los sectores con mayor potencial de utilización de este tipo de fuentes de energía y, en este sentido, son abundantes las experiencias en explotaciones agrícolas que acreditan un uso viable y eficaz de sistemas autónomos de electrificación y bombeo alimentados por energías renovables.

En el caso de de los invernaderos puede decirse, además, que estos en sí mismos constituyen dispositivos de transformación energética a partir una fuente renovable como es el sol; aunque hay que decir también que la existencia de cultivos en su interior hace que el tratamiento de flujos de masa y energía deba ser mucho más sofisticado que en el de un colector solar térmico, Boulard y Baille (1987); Abdel-Ghany y Al-Helal (2010). Esta analogía de partida, junto con el condicionante genérico en este tipo de explotaciones de optimización de consumos -agua, energía, materiales,...- actúa a favor de la implantación de fuentes renovables en mayor medida que en otros entornos productivos.

Con todo, a la hora de plantearse cualquier proyecto de integración de fuentes renovables en invernaderos debe partirse de las siguientes consideraciones:

- La condición de mínima interferencia de los sistemas renovables instalados en los ciclos productivos propios de los invernaderos.
- La asunción de un modo de operación en consumo autónomo (térmico y/o eléctrico) o un modo de operación en inyección a la red preexistente.

La primera consideración aparece debido a que la naturaleza dispersa de algunos recursos renovables, especialmente en el caso de la radiación solar, exige en algunos casos que las superficies de captación de los dispositivos de transformación puedan alcanzar valores significativos y provocar una reducción del área disponible para cultivos, bien por ocupación directa de espacio de la explotación o bien por el incremento de las áreas sombreadas en el interior del invernadero.

En el segundo caso, se trata de adecuar la función de la instalación de producción de energías renovables a las necesidades concretas del invernadero. Para ello se debe partir de un conocimiento exhaustivo de la demanda eléctrica y térmica de cada explotación, cuestión ésta difícilmente sistematizable dada la enorme variedad de estructuras, equipamientos, condiciones climáticas, ciclos de producción y necesidades de los cultivos existentes. Con todo, la asignación de costos anuales medios de explotación de los invernaderos en Almería correspondientes a la energía, aunque gradualmente creciente en los últimos años y a la expectativa de los nuevos precios determinados por el agotamiento de las fuentes convencionales, es en los últimos años de sólo un 2 %, frente a otros costes como los de mano de obra y semillas, que se llevan el 40 % y el 8 % respectivamente (Cabrera *et al.*, 2010). Esta circunstancia determina que los proyectos de energías renovables en invernaderos en condiciones de autoconsumo, de acuerdo a los costes de inversión actuales, sólo sean considerados hasta la fecha en explotaciones aisladas sin acceso técnico o económicamente viable a las redes de distribución convencionales, situación muy poco habitual, o en explotaciones caracterizadas por altas demandas, especialmente térmicas<sup>1</sup>, en las que los flujos de caja negativos asociados a los consumos de combustible convencional puedan verse compensados por la amortización de la instalación de sistemas renovables.

Al contrario que en el modo de autoconsumo, la inyección a red no tiene que partir de una demanda previa a cubrir con la energía, normalmente eléctrica, producida por la instalación renovable sino que se trata de realizar una aportación directa a la red de distribución preexistente. Esta aportación, deducida la parte consumida por los sistemas internos del invernadero y adecuadamente contabilizada, podría admitir una tarificación bonificada que supondría un ingreso adicional para la explotación agrícola. Este esquema es el que ha propiciado el impulso a las grandes plantas de producción eólicas, fotovoltaicas y termosolares existentes en nuestro país y en otros de nuestro

<sup>1</sup> No existe a la fecha actual capacidades para el almacenamiento masivo de electricidad y, por lo tanto, las instalaciones renovables de generación eléctrica en autoconsumo están sujetas a la disponibilidad de viento o radiación solar.

entorno y es el que subyace, por ejemplo, en los proyectos de cogeneración a gas natural en los invernaderos que vierten a la red, a un precio de 14,5 c€/kWh para potencias instaladas de menos de 500 KWe y de 12 c€/KWh para potencias instaladas de entre 500 KWe y 1.000 KWe<sup>2</sup>.

Es esperable sin embargo que esta tarifa de inyección a red bonificada, creada por normativa<sup>3</sup> para favorecer la implantación y el desarrollo de las distintas tecnologías renovables o energéticamente eficientes, como es el caso de la cogeneración, se vaya aplicando de forma cada vez más selectiva y vaya sufriendo ajustes para, finalmente, desaparecer o ser considerada exclusivamente en instalaciones inequívocamente innovadoras, Haas *et al.* (2011). Esta circunstancia debe ser tenida en cuenta por lo tanto en la implantación de proyectos de energías renovables en invernaderos cuya justificación tenga una base preponderantemente financiera.

Por el contrario, en un escenario de tecnologías maduras y precios altos de las fuentes convencionales, las energías renovables en los invernaderos presentan un gran potencial desde un punto de vista de integración en sistemas inteligentes de distribución (Chicco y Mancarella, 2009) en los que ya no solo se deben de tener en cuenta los consumos propios sino la sincronía de operación con el resto de infraestructuras colindantes (almacenes, centros de manipulado, industrias auxiliares,...). Este potencial queda corroborado, en el caso de la provincia de Almería, por el peso del consumo eléctrico del sector agrícola que en el año 2009 fue el 12,6 % del consumo total, frente al 4 % que supuso el mismo sector para el resto de provincias andaluzas (Figura 1).

De forma suplementaria a la generación térmica y eléctrica, las energías renovables presentan un gran interés para el sector de los invernaderos a través de aprovechamientos indirectos, que pueden dividirse en dos modalidades:

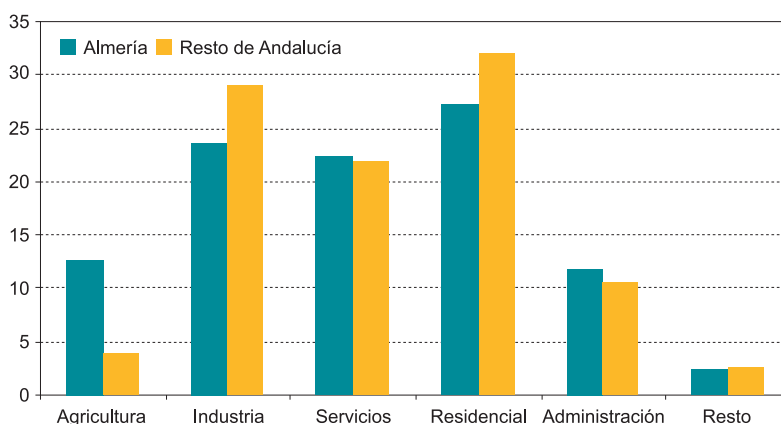
- a) Mecanismos de optimización a través de almacenamiento térmico<sup>4</sup> en sus tres modalidades: almacenamiento en medios convencionales (agua, grava,...), almacenamiento en el terreno y almacenamiento en medios avanzados, especialmente en materiales en cambios de fase (PCM). El almacenamiento

<sup>2</sup> Tarifa segundo trimestre de 2011.

<sup>3</sup> Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

<sup>4</sup> International Energy Agency. ECES Energy Conservation through Energy Storage Program. Thermal Energy Storage Applications in Closed Greenhouses Sub-program (Annex 22).

**Figura 1: Porcentaje sobre el consumo total de electricidad para distintos sectores para la provincia de Almería y para el resto de Andalucía** AGR: Agricultura, IND: Industria, SERV: Comercio-Servicios, RES: Sector Residencial, ADM: Administración y Servicios públicos y REST: Resto de consumos



Fuente: Instituto Estadístico de Andalucía, año 2009.

térmico debe ser considerado, independientemente del aprovechamiento o no de fuentes renovables, como uno de los pilares de cualquier proyecto de eficiencia energética en invernaderos (Valera *et al.*, 2008).

- b) Uso de las energías renovables en el tratamiento de agua (Blanco *et al.*, 2009), que, a su vez, admite tres sub-modalidades: desalación, tanto por destilación térmica (integrada, García Mari *et al.*, 2007), o anexa en el invernadero) como por membrana, desinfección y regeneración de efluentes.

Existen de hecho experiencias como el invernadero Watergy (Zaragoza *et al.*, 2007), construido y ensayado en la Estación experimental de Cajamar que combinan de forma eficiente diversos de los conceptos mencionados (Figura 2). También son mencionables otros prototipos y conceptos como los de los



**Figura 2: Prototipo watergy instalado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar (Almería)**

proyectos "inversos", "cenit-mediodía" o "euphoros" en las que, de nuevo, se integran mecanismos de aprovechamiento de la radiación solar, almacenamiento de calor y dispositivos de acondicionamiento innovadores que demuestran la viabilidad funcional de los sistemas renovables en los invernaderos y, especialmente, su contribución a la mejora de la propia producción hortícola<sup>5,6</sup>.

## 2. Tecnologías renovables aplicables a los invernaderos

Las energías renovables abarcan un amplio abanico de tecnologías cuyo nexo común es el uso de fuentes primarias de carácter permanente y origen natural que, aún contando con un gran potencial, se presentan de forma dispersa en el espacio y, en algunos casos cuando la fuente tiene una naturaleza climática, como el sol o el viento, está sujeta tanto a ciclos naturales como a eventos impredecibles que condicionan su uso continuo y estable. Por el contrario, las fuentes convencionales de origen fósil permiten un aprovechamiento intensivo de las centrales de transformación a costa, sin embargo, de un fuerte impacto ambiental y del agotamiento de los yacimientos.

En una primera aproximación, es posible identificar como aplicables a los invernaderos las siguientes tecnologías renovables.

- Energía solar térmica de baja temperatura.
- Energía solar fotovoltaica.
- Energía de la biomasa.

Existen otras energías renovables como la energía micro y mini-eólica<sup>7</sup> y la geotérmica<sup>8</sup>, ambas de alto potencial y cuyo aprovechamiento en invernaderos no requiere, en principio, un tratamiento diferenciado ya que podrían ser aplicadas siempre que existiesen los recursos climáticos o geológicos adecuados, independientemente de la integración estructural o no de los sistemas.

<sup>5</sup> [www.cenitmediodia.com](http://www.cenitmediodia.com)

<sup>6</sup> [www.euphoros.wur.nl](http://www.euphoros.wur.nl)

<sup>7</sup> Micro eólica: P<1 KW, Minieólica: P<100 KW.

<sup>8</sup> Especialmente la denominada energía geotérmica somera o de baja entalpía.

## 2.1. Energía solar térmica de baja temperatura

Como se ha dicho, la analogía entre un invernadero y un colector solar aunque no estricta, resulta de gran utilidad a la hora de justificar el potencial de aprovechamiento de las energías renovables en este sector. De hecho, durante los años 80, a raíz de la primera gran crisis del petróleo, se realizaron multitud de experiencias en Europa (Von Zalbetitz, 1987), con el fin de evaluar distintas configuraciones de captadores solares aplicables a invernaderos, distinguiéndose entonces básicamente las siguientes tres modalidades:

- a) Captadores térmicos externos al invernadero.
- b) Captadores térmicos integrados en la cubierta del invernadero.
- c) Utilización del invernadero como captador solar.

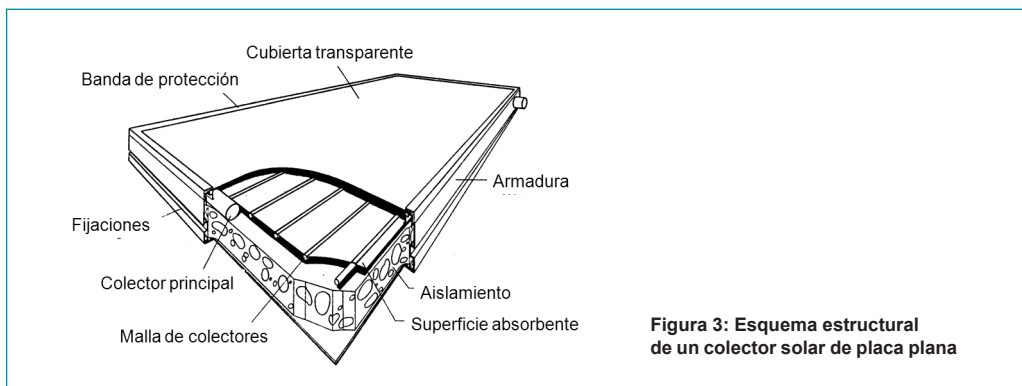
En los dos primeros casos, el punto de partida fueron tanto captadores planos convencionales como desarrollos específicos de bajo costo de caucho EPDM y captadores de aluminio de tipo Roll-Bond, Montero *et al.* (1985). Experiencias posteriores han corroborado el potencial, ampliándose incluso las opciones de captadores de bajo costo por el uso placas de polietileno alveolar transparente en el interior del propio invernadero (Bargach *et al.*, 2004), o sistemas de calentamiento de aire constituidos por revestimientos plásticos sobre lechos absorbentes de arena situados sobre el terreno (Ghosal *et al.*, 2005).

Independientemente de su emplazamiento, materiales o configuración, la capacidad de generación térmica de un captador solar va a estar determinada por su curva característica, que relaciona el rendimiento del captador,  $h$ , definido como el calor útil producido  $Q_u$  (W) dividido por la energía solar incidente, igual a la irradiancia solar global  $G$  (W/m<sup>2</sup>) por la superficie del captador,  $S$  (m<sup>2</sup>), con parámetros característicos  $a$  y  $b$  obtenidos de acuerdo a ensayos normalizados y con las condiciones de funcionamiento:  $T_a$  temperatura ambiente,  $T_{fe}$  temperatura del fluido a la entrada del captador.

$$\eta = \frac{Q_u}{GS} = F_R \bar{\tau} \bar{\alpha} - U_L F_R \left( \frac{T_{fe} - T_a}{G} \right) = a - b \left( \frac{T_{fe} - T_a}{G} \right)$$

De la expresión de la curva se deduce la existencia de un término fijo en el rendimiento relacionado con las características de absorción solar del captador y un término variable de pérdidas que se incrementa para valores de aislamiento reducidos ( $U_L$  altos) o para mayores temperaturas de operación. Así, por ejemplo, los colectores de bajo costo lo son en función de la no utilización de cubiertas transparentes o cubiertas poco aislantes lo que determina una operación óptima a bajas temperaturas, pero pérdidas de rendimiento importantes cuando dichas temperaturas se hacen mayores.

Los colectores de placa plana convencionales, cuya estructura puede apreciarse en la figura 3, cuentan con valores de  $a$  que oscilan entre 0,7 y 0,8 y valores de  $b$  que oscilan entre 4 y 7  $W/K \cdot m^2$ .



**Figura 3: Esquema estructural de un colector solar de placa plana**

Los colectores de tubo de vacío, captadores avanzados en los que el absorbente en lugar de ocupar una cavidad rectangular se coloca en un tubo de cristal que se ha sometido al vacío para mejorar su aislamiento, cuentan con peor rendimiento óptico pero sin embargo presentan valores de  $b$  más elevados y, por lo tanto, mejores rendimientos energéticos a temperaturas más elevadas. A grosso modo puede plantearse como rangos térmicos con rendimientos aceptables, dependiendo de la demanda, del orden de 35-45 °C para colectores sin cubierta, de 40 a 80 °C para colectores planos convencionales y a partir de 70 °C para tubos de vacío.

Es precisamente este factor de rendimiento el principal elemento limitador de aplicación de esta tecnología en los invernaderos ya que en aplicaciones en calefacción, los valores de radiación disponible en invierno combinados con las pérdidas propias

del proceso de conversión determinan que las superficies de captación necesarias para la generación de fracciones de cobertura solar elevadas conlleven una ocupación del terreno considerables.

Este factor limitante para la implantación de sistemas solares térmicos en los invernaderos puede solventarse en las siguientes circunstancias:

- a) A través del aprovechamiento solar en los meses de máxima disponibilidad en la generación de frío mediante máquinas de absorción, (Sethi y Sharma, 2007).
- b) A través de planteamientos integrados que incluyan centralizaciones y redes de distribución térmica en las que pueden tener cabida otro tipo de fuentes no estrictamente solares (biomasa, calores residuales de industrias auxiliares,...) y que incluyan mecanismos de almacenamiento estacional como los que ya existen para algunos entornos urbanos (Pinel *et al.*, 2011).

En los invernaderos, junto a las modalidades de captación solar mencionadas, se han identificado siguientes modalidades de almacenamiento térmico según Sethi y Sharma (2008), todas ellas orientadas a combatir el ciclo térmico diario gracias al excedente de energía obtenido durante las horas de sol:

- a) Bolsas/tubos de plástico.
- b) Depósitos rígidos en el interior del invernadero.
- c) Tanques de almacenamiento convencionales exteriores.
- d) Almacenamiento en lecho de roca (grava, guijarros, hormigón,..).
- e) Almacenamiento en el terreno.
- f) Almacenamiento en materiales de cambio de fase.

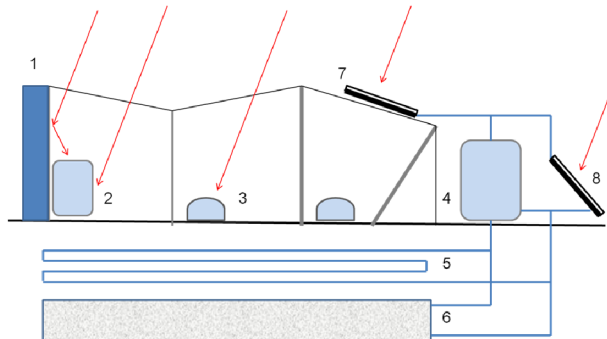
Después de una primeras experiencias en Almería con bolsas de PE negro (Castilla *et al.*, 1985), experiencias posteriores (Montero, 1992), con tubos de polietileno transparente de 250 mm con un porcentaje de suelo cubierto entre el 30 y el 40 % y



agua acumulada a razón de 70-100 l/m<sup>2</sup> de suelo de invernadero demostraron un rendimiento de captación solar entre el 30 y el 50 % a precios aproximados de de 0,20 €/m<sup>2</sup> consiguiéndose incrementos medios de las temperaturas mínimas de hasta 3 °C y en días muy favorables de hasta 5 °C. A pesar de ser considerado como un buen sistema antiheladas, la alta ocupación del suelo interior de los invernaderos que supone la utilización de estos sistemas limita su aplicación por las dificultades introducidas en labores como la recogida, la aplicación de fitosanitarios, etc.



**Figura 4: Almacenamiento sensible en bolsas de PE negras utilizadas como captadores solares**



**Figura 5: Esquemas de acoplamiento captador solar/almacenamiento térmico en invernaderos.**

**1:** Acumulación en muro norte, **2:** acumulación depósitos interiores (agua/PCM), **3:** acumulación bolsas/tubos PE, **4:** acumulación depósito convencional exterior, **5:** acumulación en terreno por distribución con agua, **6:** acumulación en lecho de roca, **7:** captador solar integrado y **8:** captador solar externo

## 2.2. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es, dentro de las energías renovables, la de mayor potencial de integración estructural en los invernaderos. Esto es así porque desarrollos recientes de módulos permiten contar con soluciones acoplables a cubiertas tanto desde el punto de vista de peso y flexibilidad como desde el punto de vista de transparencia. La cuestión clave, al igual que en el caso anterior, se trata de que la disposición espacial de estos elementos garantice una producción ajustada a la demanda programada, tanto en autoconsumo como en inyección a red y, a la vez, no altere la calidad de los frutos y la productividad del invernadero.

Aunque existe mucha experiencia sobre la influencia del sombreado de la cubierta de los invernaderos en los cultivos (Callejón-Ferre *et al.*, 2009; López *et al.*, 2008; Kittas *et al.*, 2003; Baille *et al.*, 2008), la misma está asociada a la utilización de mallas de sombreado o al encalado del plástico que son operaciones de carácter estacional que no sirven de referencia en el caso de los módulos fotovoltaicos que, una vez instalados, deben permanecer fijos en la estructura el mayor tiempo posible.

A efectos descriptivos, podemos considerar un módulo fotovoltaico como un generador eléctrico cuya producción se encuentra directamente relacionada con la cantidad de radiación solar que incide sobre el mismo. Esta cantidad de electricidad va a tener también, aunque en menor medida y según el tipo de módulos, una variabilidad en función de la temperatura. El parámetro que nos va a determinar esta capacidad de producción es el rendimiento del módulo que definiremos de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{FV}}{GS}$$

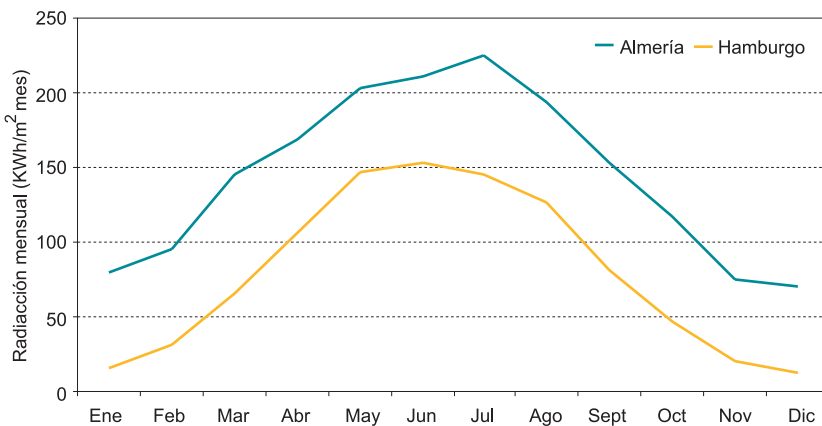
En esta expresión,  $P_{FV}$  (W) es la potencia eléctrica aportada por el módulo o célula fotovoltaica,  $S$  es la superficie del mismo ( $m^2$ ) e  $G$  la irradiancia solar incidente ( $W/m^2$ ). Esta expresión admite lógicamente integraciones temporales en energía pasándose del rendimiento instantáneo al rendimiento diario, mensual, etc. Los rendimientos de conversión varían en un amplio margen en función de la tecnología de los módulos, aunque se pueden plantear dos horquillas para las tecnologías con mayor potencial de implantación en los invernaderos, entre [4-12 %] para módulos de lámina delgada y [10-20 %] para módulos de silicio cristalino.

El valor de G es crucial junto con el valor del rendimiento del módulo para valorar la producción eléctrica. Este valor, tanto en términos instantáneos como en términos integrados en  $\text{KWh/m}^2\text{día}$  se obtiene a partir de bases de datos o de medidas experimentales y forma parte del potencial climático propio de cada emplazamiento (Figura 6).

Sobre la base de este valor climático, es necesario realizar una proyección a la inclinación y orientación, normalmente sur, de la superficie de los módulos sobre las que ya se pueden incluir condicionantes específicos como una mayor producción en los meses de verano, por lo que las inclinaciones deberán ser algo inferiores a la latitud del emplazamiento, una mayor producción en invierno, con inclinaciones mayores que la latitud y una producción uniforme y máxima acumulada anual que exige inclinaciones próximas a la latitud del lugar.

El efecto térmico está muy vinculado al tipo de célula, de tal manera que en los módulos de silicio cristalino la potencia disminuye aproximadamente un 4 % por cada  $10\text{ }^\circ\text{C}$  de aumento de la temperatura con relación a la temperatura que alcanza la célula en las condiciones estándar de ensayo. En el caso de los módulos de lámina delgada, este efecto de reducción de rendimiento por incremento de temperatura es menos relevante, con valores en el orden del 2 %.

**Figura 6. Radiación global mensual tipo para una superficie horizontal en Almería y Hamburgo**



Fuente: Meteonorm v.5.1.

Los distintos procedimientos de fabricación y materiales empleados determinan los distintos tipos de células pudiendo distinguirse entre tecnologías de silicio cristalino, obtenidas por diversos procesos de agregación sólida a partir de silicio fundido de alta pureza y células de lámina delgada obtenidas por deposición de vapor de silicio u otros materiales fotovoltaicos (TeCd,CIGS,..) sobre sustratos específicos (cristal, láminas metálicas o plásticas,...) Mientras en el primer caso se obtienen obleas compactas de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup> y unos 300 mm de espesor, en el segundo se obtienen láminas fotovoltaicas de no más de 10 mm de espesor con formas, conformación y sustratos adaptables y menor precio (Hegedus, 2006). Los rendimientos en el primer caso son mayores, como se ha dicho, pero en el segundo caso puede contarse con módulos más ligeros, flexibles o semitransparentes, de gran interés para su integración en las cubiertas de los invernaderos (Tabla 1). Existen alternativas recientes con materiales fotovoltaicos orgánicos y materiales sensibilizados por colorante (Huang *et al.*, 2010) que constituyen los denominados módulos de 3ª generación que presentan propiedades interesantes de transparencia, peso y, especialmente de costo. Pero, además de un rendimiento reducido, cuentan con problemas de estabilidad que hacen que esta tecnología no sea equiparable, hasta la fecha, con la lámina delgada.

**Tabla 1. Resumen de características de módulos cristalinos y de lámina delgada sobre sustrato plástico**

Tecnología	$\mu$ Módulo	Peso de células	Peso de módulos	Producción
Silicio Cristalino	10-20 %	1.200-1.500 gr/m <sup>2</sup>	10-20 Kgr/m <sup>2</sup>	150 Wp/m <sup>2</sup>
Lámina delgada	4-12 %	4-5 gr/m <sup>2</sup>	0,5-4 Kgr/m <sup>2</sup>	100 Wp/m <sup>2</sup>

Fuente: European Photovoltaic Industry Association (EPIA).

Los módulos comerciales están constituidos por células fotovoltaicas convenientemente conectadas entre sí, encapsuladas y protegidas contra la intemperie por diversos recubrimientos de acuerdo a la configuración final adoptada por el fabricante. Estos conexiones y recubrimientos reducen los rendimientos correspondientes a las células pero, por otro lado, garantizan un funcionamiento óptimo de las mismas para períodos superiores a los 20 años. Las tensiones nominales de los módulos oscilan entre los 10 y los 50 V en la mayor parte de los casos y las intensidades pueden llegar hasta los 20 A en condiciones de máxima incidencia de radiación solar. Cada instalación alojará la combinación serie/paralelo más conveniente de acuerdo a la carga a la que se dirija la electricidad producida por los módulos. Si se trata de una instalación autónoma tendremos que considerar la existencia de una batería electro-química, un regulador

de carga y los convertidores a tensión continua o alterna requeridos por los elementos (bombas, motores, lámparas,...) a los que la instalación esté conectada. En el caso de una instalación conectada a red, el único elemento a considerar es el denominado inversor que no es otra cosa que un convertidor de corriente continua a corriente alterna con capacidad para sincronizarse en frecuencia y tensión con la red pre-existente sobre la que se inyecta la carga procedente de los módulos fotovoltaicos.

En cuanto las opciones de transparencia de las instalaciones, distinguiremos entre las siguientes opciones:

- Módulos opacos completos, tanto flexibles como rígidos, dispuestos en las cubiertas para minimizar los efectos de sombreo sobre el cultivo. En este caso hay dos opciones de emplazamiento, el alineamiento al tresbolillo o la cobertura de áreas inactivas como pasillos o zonas perimetrales.
- Módulos de células opacas discontinuas, constituidos por células individuales entre dos cubiertas transparentes, normalmente vidrio/vidrio. La disposición y separación de las células habilita distintos niveles de transparencia (Figura 7).
- Módulos semitransparentes, constituidos por células de lámina delgada continuas sometidas a procesos de texturización láser que producen una malla de alta densidad de aperturas puntuales o lineales sobre la célula que permiten el paso de la luz a través de ella. La densidad de malla determina la transparencia del módulo (Figura 8).



**Figura 7. Configuración de módulos semitransparentes a partir de células opacas**



Figura 8. Módulos semitransparentes continuos de lámina delgada (SOLIKER-UNISOLAR)

La literatura especializada recoge algunos ejemplos de invernaderos equipados con módulos fotovoltaicos en aplicaciones autónomas para alimentar sistemas de ventilación (Janjai *et al.*, 2009; Yano *et al.*, 2007; Nayak y Tiwari, 2008) o de módulos en sistemas combinados incluyendo captadores térmicos y bombas de calor geotérmicas (Ozgener y Hepbasli, 2007; Nayak y Tiwari, 2009). Además de almacenamiento eléctrico en baterías, también se han estudiado en invernaderos opciones como electrolizadores combinados con pilas de combustible (Ganguly *et al.*, 2010). En términos generales, las aplicaciones anteriores no han precisado de la integración estructural de los módulos y por lo tanto no ha existido afectación al cultivo.

Rocamora y Tripanagnostopoulos (2006) han propuesto un esquema de integración basado en un tipo de módulos fotovoltaicos híbridos que contienen en su parte posterior un entramado que permite la circulación de agua y su posterior calentamiento, cuestión ésta que beneficia también el funcionamiento fotovoltaico ya que se reduce la temperatura de la célula (Figura 9). Sobre una demanda máxima de electricidad de un invernadero piloto en Cartagena estimada en 1,73 kWh/m<sup>2</sup> en enero y 0,25 kWh/m<sup>2</sup> en agosto. Los cálculos realizados para una ocupación del 5 % de la superficie de cubierta determinan que la producción de electricidad excede en un 12 % el consumo propio del invernadero.

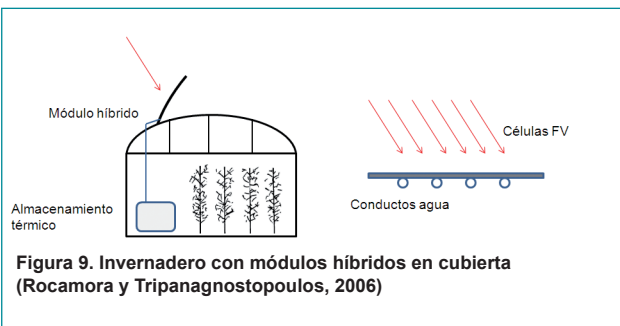


Figura 9. Invernadero con módulos híbridos en cubierta (Rocamora y Tripanagnostopoulos, 2006)

Yano *et al.* (2010) han estudiado la distribución espacial de radiación en el interior de un invernadero orientado este-oeste de cubierta curva y 12,9 % de ocupación de la misma en la ciudad de Matsue en Japón. En el trabajo también se valoró la producción eléctrica de dos configuraciones de módulos, en ambos casos situados en el interior del invernadero: un alineamiento continuo y un alineamiento al tres bolillo de 30 módulos flexibles de 90x46 cm<sup>2</sup> cada uno (Figura 10). Los resultados demuestran una distribución de radiación interior más uniforme en el alineamiento al tres bolillo. La estimación de la producción fotovoltaica anual fue del orden 8 kWh/m<sup>2</sup>

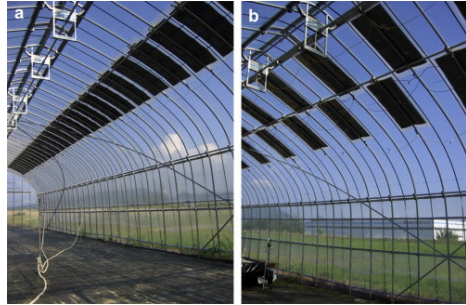
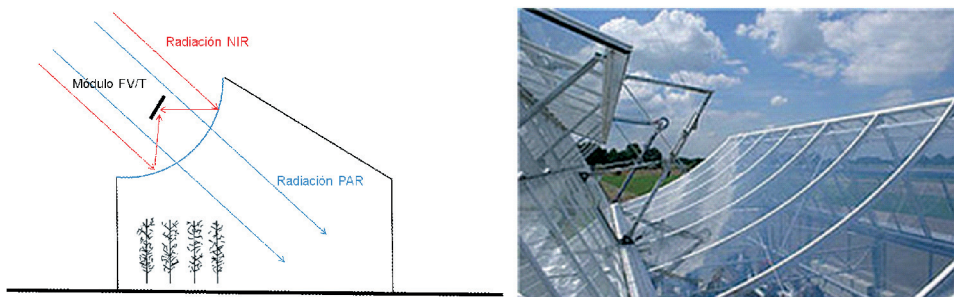


Figura 10: Invernadero con módulos flexibles en disposición lineal (a) y en disposición al tres bolillo (b), Yano *et al.* (2010)

Sonneveld *et al.* (2010) han diseñado y ensayado un nuevo tipo de invernadero, invernadero ELKAS, que utiliza una cubierta curva como superficie reflectante de la radiación solar en el infrarrojo cercano (NIR) hacia un módulo híbrido como el mencionado anteriormente. Además de la generación de calor y electricidad, este diseño reduce el área de sombreado ya que por efecto de la concentración, del orden de x30, se obtienen flujos energéticos más elevados sobre el módulo y por lo tanto no se hace necesaria una mayor ocupación. La producción eléctrica anual de este invernadero está en el orden de 20 kWh/m<sup>2</sup> y la producción térmica es de 576 MJ/m<sup>2</sup>.

Figura 11. Invernadero ELKAS (Sonneveld *et al.*, 2010)





De forma suplementaria, Sonneveld *et al.* (2011) también han propuesto y ensayado la integración en la cubierta del invernadero de concentradores transparentes tipo Fresnel sobre módulos híbridos termo-fotovoltaicos. El redireccionamiento de la radiación procedente del disco solar bloquea la entrada en verano del 75 % de la aportación solar al interior del invernadero reduciendo su carga de refrigeración en un factor 4. El factor de concentración en este prototipo es de x25, siendo la producción eléctrica de 29 kWh/m<sup>2</sup> y la producción térmica de 518 MJ/m<sup>2</sup>, lo que de acuerdo a los autores del estudio supone que el sistema podría hacer frente a la demanda energética completa de un invernadero bien aislado en el norte de Europa.

En Almería, experiencias realizadas en la finca experimental UAL-ANECOOP con 24 módulos de lámina delgada flexibles opacos de 300x40 cm<sup>2</sup> dispuestos al tres bolillo y cubriendo un 10 % sobre la cubierta del invernadero piloto, (Pérez *et al.*, 2010) obtuvieron una producción de 8,25 kWh/m<sup>2</sup>.

**Figura 12. Principio de funcionamiento de un invernadero con concentrador lineal Fresnel (Sonneveld *et al.*, 2011) e invernadero Technokas, EZ Idea Solution**



### 2.3. Energía de la biomasa

El empleo de la biomasa como fuente de energía ha experimentado un importante desarrollo en los últimos años, debido a las diferentes iniciativas puestas en marcha desde organismos e instituciones en política de energías renovables. El aprovechamiento energético de la biomasa tiene como principal ventaja respecto a los combustibles fósiles, el presentar un ciclo neutro de CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, no contribuir al efecto invernadero atmosférico (Werther *et al.*, 2000). Otras ventajas son la menor emisión de partículas y gases contaminantes como CO, HC y NO<sub>x</sub> (IDAE, 2007). En el caso de los invernaderos,



deros, el uso de la biomasa tiene el valor añadido de que pueden llegar a obtenerse balances negativos de CO<sub>2</sub> por la reutilización de las emisiones de la combustión en el enriquecimiento carbónico de los cultivos.

El PANER, Plan de Energías Renovables 2011-2020 destaca el aprovechamiento energético de la biomasa como una de sus prioridades y realiza una primera valoración de estado a la que es esperable que se incorpore de forma específica la biomasa vinculada a la agricultura intensiva.

En general, el empleo de los residuos vegetales como fuente de energía presenta una serie de problemas prácticos relacionados con la baja densidad, que da lugar a altos costes de transporte y almacenamiento, y con el alto contenido de humedad, que favorece la degradación biológica y dificulta el control de procesos. Por estas razones, la masa vegetal no se puede utilizar directamente como combustible. Es necesario someterla a algún proceso de transformación. Los más empleados son la pirolisis, la gasificación y la densificación.

Durante la densificación, la masa vegetal es sometida a elevadas presiones para obtener elementos con una mayor densidad volumétrica y energética, más fáciles de almacenar y transportar, además de ser elementos más homogéneos en características y propiedades, más limpios y mucho más fáciles de manejar (Werther *et al.*, 2000, Ortiz *et al.*, 2003). Las técnicas de densificación más empleadas son el briquetado y el pelletizado.

Las briquetas y los pellets presentan unos valores similares en cuanto a poder calorífico, humedad y propiedades químicas. La principal diferencia está en el tamaño y en la densidad. Los pellets son elementos cilíndricos con un diámetro comprendido entre 6 y 8 mm y longitudes entre 6 y 12 mm, con una elevada densidad. Las briquetas son elementos, normalmente cilíndricos de mayor tamaño que los pellets (diámetros comprendidos entre 5 y 10 cm y longitudes entre 15 y 50) y menor densidad. Los pellets presentan ciertas ventajas sobre las briquetas. Al tener menor tamaño que las briquetas su movimiento puede automatizarse, y ocupan menos espacio en el transporte y en almacenaje pues su densidad es, como mínimo, dos veces mayor.

Actualmente la mayor parte de elementos densificados son pellets realizados con restos forestales (serrín, virutas de madera,...). Sin embargo, el incremento de la demanda de elementos densificados ha dado lugar a que, en países como Dinamarca

y Noruega, se haya alcanzado el límite de producción. Esta situación, unida a la importancia que tiene la agricultura en algunos, ha originado que se estudie el potencial que presentan los residuos agrícolas como materias primas para la fabricación de elementos densificados, fundamentalmente pellets (agri-pellets, Figure 13).

La utilización de los residuos agrícolas presenta algunos problemas como son: el origen muy diverso: tallos de algodón (Abasaed, 1992), residuos de trigo mezclados con papel (Demirbaş, 1998), residuos de té (Demirbaş, 1999), restos de olivo Yaman (2000), cardo “*Cynara cardunculus L.*” (Alonso, 2004), esparto (Debdoubi, 2005), caña de azúcar (Erich, 2005), cáscara de arroz (Maiti *et al.*, 2006); su contaminación con productos tóxicos procedentes de los tratamientos fitosanitarios realizados durante el desarrollo del cultivo (Callejón-Ferre, 2011), se han cuantificado niveles elevados de hasta 70 sustancias tóxicas en residuos vegetales de cultivos de judía, sandía y melón (Garrido-Frenich, 2003); la elevada dispersión encarece el transporte y, la generación de residuos no se genera de forma homogénea durante todo el año, tiene sus picos a finales de las diferentes campañas agrícolas.

En general, de los diferentes estudios realizados con agri-pellets se desprende que presentan una mayor friabilidad (facilidad de desmenuzamiento) y un poder calorífico ligeramente inferior a los wood-pellets (Tabla 2, Tabla 3).



Figura 13. Diferentes presentaciones de los residuos vegetales utilizados en las calderas de biomasa; de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, cáscara de almendra, Hueso de aceituna triturado, agri-pellets de tomate de invernadero y pellets de restos de pino

Tabla 2. Poder calorífico de algunas biomásas, Valera (2008)

Tipo de biomasa	PCI <sup>1</sup> (Kcal/kg)
Pellets de madera	>4.000
Hueso de aceituna	> 3.800
Cáscara de almendra	>3.700
Orujo de uva seco	>3.800
Astillas de madera	~1.600- 3.300

**Tabla 3. Poder calorífico de biomásas procedentes de residuos de invernadero (Callejón-Ferre, 2011)**

Tipo de biomasa	PCI (Kcal/kg)
Cucurbita pepo L.	3.570
Cucumis sativos L.	3.500
Solanum melongena L.	4.590
Solanum lycopersicum L.	4.120
Phaseolus vulgaris L.	4.730
Capsicum annum L.	4.240
Citrillus vulgaris Schrad.	3.960
Cucumis melo L.	3.750

Además la combustión de los agri-pellets, respecto a la de los wood-pellets, origina una mayor emisión de partículas, mayor generación de residuos y problemas de corrosión, debido a que presentan un mayor contenido de nitrógeno (N), azufre (S), cloro (Cl) y potasio (K) que los residuos forestales. No obstante, estos problemas pueden solucionarse utilizando tecnologías de filtrado de gases, calderas de combustión apropiadas, y en cualquier caso, son menores que los originados por los combustibles fósiles (Pastre, 2002).

En el mercado en la actualidad existen un elevado número de calderas de biomasa, cada una de ellas está definida para uno o varios tipos de biomasa, de tal forma que cuando se utiliza otra biomasa diferentes y con condiciones distintas el rendimiento energético de la caldera baja, pudiendo aparecer problemas debido a las cenizas. Es importante elegir bien el tipo de caldera atendiendo al tipo de biomasa que se va a utilizar, así como la potencia de calefacción requerida por el sistema en función de las condiciones de entorno y el salto térmico deseado.

Durante el funcionamiento de la caldera se van a generar una serie de subproductos, entre estos se encuentran los gases generados en la combustión. Estos gases tienen como característica una alta concentración de CO<sub>2</sub> y un bajo contenido de residuos, lo que facilitaría su utilización para el enriquecimiento carbónico de los cultivos de invernadero, como se ha comentado con anterioridad. Por lo tanto, una caldera de biomasa debería ser capaz de generar el calor necesario para la calefacción del invernadero y a su vez generar los gases de combustión suficientes para el enriquecimiento carbónico durante el periodo iluminado.

Este enriquecimiento es importante en los países de clima templado donde, en ausencia de otros métodos de refrigeración, el control de la temperatura se realiza mediante el intercambio convectivo de aire entre el exterior y el interior del invernadero (exterior normalmente más frío) (Kläring, 2007; Rodríguez, 2002), que se produce a través de las ventanas y afecta también a otras variables como, por ejemplo, la concentración de  $\text{CO}_2$ . Este control puede provocar decrementos en la concentración de  $\text{CO}_2$  del 20 % respecto a la exterior, (Lorenzo, 1990), aun cuando las ventanas permanecen abiertas, especialmente cuando la velocidad del viento es baja, lo que va repercutir en un descenso en la tasa de fotosíntesis (Rodríguez, 2002). Por otra parte, diversos autores han mostrado que aumentando la concentración en el interior del invernadero también aumenta la producción (Sánchez, 2009; Hao, 2008; Edwards, 2008; Tremblary, 1998; Schmidt, 2009; Nederhoff, 1990; Portree, 1996; Zabri, 1998; Sánchez-Guerrero, 2005) y, se reduce el consumo de agua (Sánchez-Guerrero, 2005).

La instalación de un sistema de calefacción (Figura 14) mediante biomasa consta de los siguientes elementos: depósito de almacenamiento de la biomasa, cámara de combustión transporte, caldera (vapor, agua caliente, aceite térmico), equipo de transporte y dosificación de la biomasa desde el depósito a la cámara de combustión, recuperadores auxiliares de calor, depuración de gases, extracción de cenizas (en la caldera de biomasa las cenizas se han de retirar periódicamente) y equipo recuperación de gases para el enriquecimiento carbónico (en el caso de utilizarse).

**Figura 14. Sistema de calefacción por combustión de biomasa instalado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar**



**Figura 14a. Quemador de biomasa con todos los elementos, incluso depósito para pellets.**



**Figura 14b. Sistema de almacenamiento de  $\text{CO}_2$  producido durante la combustión**

Del mismo modo, el uso de la caldera para enriquecimiento requiere la adición de un subsistema, bien para el almacenamiento del calor para calefacción o, bien para el almacenamiento del CO<sub>2</sub> para inyección carbónica a los cultivos. Esto se debe a que ambos *inputs* del sistema proceden del mismo generador (la caldera) y difieren en los tiempos en los que son administrados en el sistema (noche/día). Por una parte, el calor para calefacción es necesario sobre todo durante la noche (en clima templados/mediterráneos), y en muy pocas ocasiones, en un ciclo de cultivo, el aporte de calor es requerido durante el día. Por el contrario, el enriquecimiento carbónico es necesario durante las horas de sol, sobre todo cuando la radiación solar es máxima. Ante esta situación se hace necesaria la instalación de un sistema diurno de almacenaje de calor para calefacción o nocturno de almacenaje de CO<sub>2</sub>.

### 3. Conclusiones

Los invernaderos constituyen un ámbito muy favorable para la implementación de sistemas energéticos renovables aunque, al igual que en el caso de otros aspectos básicos de su funcionamiento como las estructuras, los sistemas de acondicionamiento y control climático o fertirrigación, no es posible asumir la existencia de soluciones de tipo general reproducibles de manera sistemática como ocurre, p.e. en el caso de la aportación de agua caliente a las viviendas o en las plantas eólicas o solares de producción de electricidad. Solventadas las cuestiones básicas como la preservación de la función productiva del invernadero, especialmente, y la adopción de un modelo de generación determinado (autoconsumo o inyección a red), existen en la actualidad tecnologías lo suficientemente fiables como para garantizar coberturas de demanda importantes para el consumo total energético de todo el sector en la provincia de Almería. Los aspectos económicos de esta implantación, si bien no se han tratado en profundidad en este texto, no deben resultar un factor condicionante en un escenario de curvas de aprendizaje muy acusadas –la tecnología fotovoltaica ha reducido sus costes en un factor de tres en los últimos cuatro años– y de incremento de los precios de la energía, como el actual. Por el contrario, los beneficios ambientales obtenidos y el valor intangible de una producción sostenible en todos sus procesos, deben justificar los futuros desarrollos en este ámbito.

## Referencias bibliográficas

- Abasaeed, A. E. (1992): "Briquetting of carbonized cotton stalk"; *Energy*, 17(9); pp. 877-882.
- Abdel-Ghany, A. M. y Al-Helal, I. M. (2011): "Solar energy utilization by a greenhouse: General relations"; *Renewable Energy*, 36(1); pp. 189-196.
- Adaro, J. A.; Galimberti, P. D.; Lema, A. I.; Fasulo, A. y Barral J. R. (1999): "Geothermal contribution to greenhouse heating"; *Applied Energy*, 64(1-4); pp. 241-249.
- Agencia Andaluza de la Energía (2008): "Situación de la biomasa en Andalucía. Consejería de Innovación Ciencia y Empresa"; Junta de Andalucía. [http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/portal/com/bin/contenidos/proyectos/areas/energiasRenovables/biomasa/proy\\_biomasa1/1202479474122\\_la\\_biomasa\\_en\\_andalucxa\\_en08.pdf](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/agenciadelaenergia/portal/com/bin/contenidos/proyectos/areas/energiasRenovables/biomasa/proy_biomasa1/1202479474122_la_biomasa_en_andalucxa_en08.pdf).
- Alonso, J. J. (2004): "Dinamización de los municipios segovianos de Abades, Fuentemilanos y Valdeprados, mediante la instalación de una industria de pelletizado de cardo (*Cynara cardunculus* L.) para su posterior uso como combustible. Aplicación al caso particular de la sustitución de gasóleo C por pellets en la residencia de Válidos de Segovia, para la obtención de calefacción y agua caliente sanitaria"; Proyecto fin de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid.
- Baille, A.; Kittas, C. y Katsoulas, N. (2008): "Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning"; *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(4); pp. 293-306.
- Bargach, M. N.; Tadili, R.; Dahman, A. S. y Boukallouch, M. (2004): "Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco"; *Renewable Energy*, (29); pp. 1.073-1.083.
- Blanco, J.; Malato, S.; Fernández-Ibañez, P.; Alarcón, D.; Gernjak, W. y Maldonado, M. I. (2009): "Review of feasible solar energy applications to water processes"; *Review Article Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7); pp. 1.437-1.445.

- Boulard, T. y Baille, A. (1987): "Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector"; *Energy in Agriculture* 6(1); pp. 17-26.
- Boulard, T. y Baille, A. (1986): "Simulation and Analysis of Soil Heat Storage Systems for a Solar Greenhouse"; *Energy in Agriculture*; pp. 175-184
- Cabrera, A.; Marzo, B.; Uclés, D.; Molina, J.; Gázquez, J. C. y García, R. (2010): "Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería Campaña 2009/2010"; *Informes y Monografías*. Fundación Cajamar.
- Callejón-Ferre, A. J.; Velázquez-Martí, B.; López-Martínez, J. A. y Manzano-Agugliaro, F. (2011): "Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (15); pp. 948-955.
- Callejón-Ferre A. J.; Manzano-Agugliaro, F.; Díaz-Pérez, M.; Carreño-Ortega, A. y Pérez-Alonso, J. (2009): "Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions"; *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(1); pp. 41-49.
- Chaibi, M.T. (2000): "Analysis by simulation of a solar still integrated in a greenhouse roof"; *Desalination*, (128); pp. 123-138.
- Chicco, G. y Mancarella, P. (2009): "Distributed multi-generation: A comprehensive view"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3); pp. 535-551.
- Debdoubi, A.; El Amarti, A. y Colacio, E. (2005): "Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed"; *Energy Conversion and Management*, (46); pp. 1.877-1.884.
- Demirbaş, A. y Şahin, A. (1998): "Evaluation of biomass residue - briquetting waste paper and wheat-straw mixtures"; *Fuel Processing Technology*, 55(2); pp. 175-183.
- Demirbaş, A. (1999): "Evaluation of biomass materials as energy sources-upgrading of tea waste by briquetting process". *Energy Sources*, 21(3); pp. 215-220.

- Erlich, C.; Öhman, M.; Björnbom, E. y Fransson, T. H. (2005): "Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse pellets"; *Fuel*, (84); 569-575.
- Edwards, D.; Jolliffe, P.; Baylis, K. y Ehret, D. (2008): "Towards a plant-based method of CO<sub>2</sub> management"; *Acta Hort.* (ISHS), (797); pp. 273-278.
- García Mari, E.; Gutiérrez Colomer, R. P. y Adrados Blaise-Ombrecht, C. (2007): "Performance analysis of a solar still integrated in a greenhouse Desalination"; *Solar Energy*, (203); pp. 435-443.
- Garrido-Frenich, A.; Arrebola, F. J.; González-Rodríguez, M. J.; Vidal, J. L. (2003): "Rapid pesticide analysis, in post-harvest plants used as animal feed, by low-pressure gas chromatography-tandem mass spectrometry"; *Anal. Bioanal. Chem.* (377); pp. 1.038-1.046.
- Ganguly, A.; Misra, D. y Ghosh, S. (2010): "Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse"; *Energy and Buildings*, 42(11); pp. 2.036-2.043.
- Ghosal, M. K.; Tiwari, G. N.; Das, D. K. y Pandey K. P. (2005): "Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse"; *Energy and Buildings*, (37); pp. 613-621.
- Haas, R.; Panzer, C.; Resch, G.; Ragwitz, M.; Reece, G. y Held A. (2011): "A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries"; *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 15(2); pp. 1.003-1.034.
- Hao, X.; Wang, Q. y Khosla, S. (2008): "Responses of greenhouse tomatoes to summer CO<sub>2</sub> enrichment"; *Acta Hort.* (ISHS), (797); pp. 241-246.
- Hegedus, S. (2006): "Thin Film Solar Modules: The Low Cost, High Throughput and Versatile Alternative to Si Wafers"; *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, (14); pp. 393-411.
- Huang, J.; Li, G. y Yang Y. (2008): "A Semi-transparent Plastic Solar Cell Fabricated by a Lamination Process"; *Advanced Material*, 20(3); pp. 415-419.



- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2007): "Energía de la Biomasa. Manuales de energías renovables 2"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_2.1.7\\_Biomasa\\_9f14f7de.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Biomasa_9f14f7de.pdf).
- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2005): "Plan de Energías Renovables en España 2005-2010"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Plan\\_de\\_Energias\\_Renovables\\_en\\_Espana\\_completo\\_49e2ac7d.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Plan_de_Energias_Renovables_en_Espana_completo_49e2ac7d.pdf).
- IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía). (2011): "Plan de Energías Renovables en España 2011-2020"; Ministerio de Industria. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Resumen\\_PER\\_2011-2020\\_26-julio-2011\\_58f27847.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Resumen_PER_2011-2020_26-julio-2011_58f27847.pdf).
- Kittas, C.; Katsoulas, A. y Baille, A. (2003): "Influence of aluminized thermal screens on greenhouse microclimate and night transpiration"; *Acta Hort*, (614); pp. 387-392.
- Kläring, H. P.; Hauschild, C.; Heißner, A.; Bar-Yosef, B. (2007): "Model-based control of CO<sub>2</sub> concentration in greenhouses at ambient levels increases cucumber yield"; *Agricultural and Forest Meteorology*, (143); pp. 208-216.
- Wang, L.; Fang, X. y Zhang, Z. (2010): "Design methods for large scale dye-sensitized solar modules and the progress of stability research"; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9); pp. 3.178-3.184.
- Lopez, J. C.; Baille, A.; Bonachela, S. y Perez-Parra J. (2008): "Analysis and prediction of greenhouse green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in a Mediterranean climate"; *Biosystems Engineering*, 100(1); pp. 86-95.
- Lorenzo, P.; Maroto, C. y Castilla, N. (1990): "CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in almeria (Spain)". *Acta Horticulturae (ISHS)*, (268); pp.165-170.
- Mahmoudi, H.; Abdul-Wahab, S. A.; Goosen, M. F. A.; Sablani, S. S.; Perret, J.; Ouagued, A. y Spahis, N. (2008): "Weather data and analysis of hybrid photovoltaic-wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries". *Desalination*, 222(1,3); pp. 119-127.

- Maiti, S.; Dey, S.; Purakayastha, S. y Ghosh, B. (2006): "Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source"; *Bioresource Technology*, (97); pp. 2.065-2.070.
- Milenić, D.; Vasiljević, P. y Vranješ, A. (2010): "Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes"; *Energy and Buildings*, 42(5); pp. 649-657.
- Montero, J. I.; Castilla, N. y Bretones, F. (1985): "Evaluación de colectores solares térmicos de bajo costo"; Actas IX Reunión de Bioclimatología. Estación Experimental de Zonas Áridas, CSIC. Almería, octubre.
- Montero, M.; Marfa, M.; Serrano, T. y Anton, S. (1987): "Use of solar energy for heating of greenhouses"; Von Zabeltitz, C. (eds.): *Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*. REU Technical Series 3. FAO, ENEA, Roma; pp. 133-139.
- Nayak, S. y Tiwari, G. N. (2008): "Energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar greenhouse"; *Energy and Buildings*, 40(11); pp. 2.015-2.021.
- Nayak, S. y Tiwari, G. N. (2009): "Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods"; *Energy and Buildings*, 41(8); pp. 888-896.
- Nederhoff, E. M. (1990): "Technical aspects, management and control of CO<sub>2</sub> enrichment in greenhouses"; *Acta Hort. (ISHS)*, (268); pp. 127-138.
- Ortiz, L.; Tejada, A.; Vázquez, A. y Piñeiro, G. (2003): "Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria, III: Producción de elementos densificados. CIS-Madera (España)"; Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera de Galicia, (11); pp. 17-32.
- Ozgener, O. (2010): "Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings"; *Energy*, 35(1); pp. 262-268.

- Ozgener, O. y Hepbasli, A. (2005): "Performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: an experimental study"; *Building and Environment*, (40); pp. 1.040-50.
- Ozgener, O. y Hepbasli, A. (2007): "A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse"; *Building and Environment*, 42(1); pp. 11-2.
- Pastre, O. (2002): "Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues"; Pellets for Europe <http://www.pelletcentre.info/resources/1094.pdf>.
- Pérez, J.; Carreño, A.; Pérez, M.; Callejón, A. J. y Vázquez F. J. (2010): "Experiences on the integration of thin film photovoltaic modules in a Mediterranean greenhouse". *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)*. Québec, Canada, 13-17Junio, 2010.
- Pinel, P.; Cruickshank, C. A.; Beausoleil-Morrison, I. y Wills, A. (2011): "A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications"; *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 15(7); pp. 3.341-3.359.
- Portree, J. (1996): "Greenhouse vegetable production guide for commercial growers"; Province of British Columbia Ministry of Agriculture, *Fisheries and Food*.
- Qingfen, M.; Hui L. (2011): "Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art"; *Desalination*, 277(1-3); pp. 274-280.
- Rocamora, M. C. y Tripanagnostopoulos, Y. (2006): "Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses"; *Acta Horticulturae*, (719); pp. 239-245.
- Rodríguez, F. (2002): "Modelado y control de crecimiento de cultivos en invernadero"; Tesis doctoral, Universidad de Almería (España), p. 210.

- Sánchez, J. A.; Berenguel, M.; Guzmán, J. L.; Ación, F. G. y López, J. C. (2009): "Estrategias de control de temperatura incrementando la concentración de CO<sub>2</sub> por combustión en cultivo bajo plástico"; V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico AGROINGENIERÍA 2009. Lugo, España.
- Sánchez-Guerrero, M. C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Castilla, N.; Soriano, T. y Baille, A. (2005): "Effect of variable CO<sub>2</sub> 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. y Castilla, N. (2009): "Effects of EC-based irrigation scheduling and CO<sub>2</sub> enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop"; *Agricultural water management*, (96); pp. 429-436.
- Schmidt, U.; Huber, C.; Rocks, T.; Salazar Moreno, R. y Rojano Aguilar, A. (2008): "Greenhouse cooling and carbon dioxide fixation by using high pressure fog systems and phytocontrol strategy"; *Acta Hort. (ISHS)*; (797); 279-284.
- Sethi, V. P. y Sharma S. K. (2008): "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications"; *Solar Energy*, 82(9); pp. 832-859.
- Sethi, V. P. y Sharma, S. K. (2007): "Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications"; *Solar Energy*, 81(12):1447-1459
- Sonneveld P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Van Tuijl, B. A. J.; Janssen, H. J. J.; Campen, J.; Bot, G. P. A. (2011): "Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses"; *Solar Energy*, 85(3); pp. 432-442.
- Sonneveld P. J.; Swinkels, G. L. A. M.; Campen, J.; Van Tuijl, B. A. J.; Janssen, H. J. J.; Bot, G. P. A. (2010): "Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production"; *Biosystems Engineering*, 106(1); pp. 48-57.

- Valera, D.; Molina, F. y Alvarez, A. J. (2008): "Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos". Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), Madrid. p. 72.
- Zambeltitz, V. (1987): "Greenhouse Heating with Solar Energy"; Roma. FAO-CNRE.
- Tremblary, N. y Gosselin, A. (1998): "Effect of carbon dioxide enrichment and light"; *HortTechnology*, 8(4); pp. 524-528.
- Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E. U.; Ogada, T. y Siagi, Z. (2000): "Combustion of agricultural residues"; *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(2000); pp. 1-27.
- Yaman, S.; Şahan, M.; Haykiri-Aşma, H.; Şeşen, K. y Küşükbayrak, S. (2000): "Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste"; *Fuel Processing Technology*, (68); pp. 23-31.
- Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu F. y Noda. S. (2010): "Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse"; *Biosystems Engineering*, 103(2); pp. 228-238.
- Yano, A.; Tsuchiya, K.; Nishi, K.; Moriyama, T. y Ide, O. (2007): "Development of a Greenhouse Side-ventilation Controller driven by Photovoltaic Energy"; *Biosystems Engineering*, 96(4); pp. 633-641.
- Zabri, A. y Burrage S. (1998): "The effect of vapor pressure deficit (DPV) and enrichment with CO<sub>2</sub> on Water relations, photosynthesis, stomatal conductance and plant growth of sweet pepper grown by NFT"; *Acta Horticulturae*, (449); pp. 561-567.
- Zaragoza, G.; Buchholz, M.; Jochum, P. y Pérez-Parra, J. (2007): "Watergy project: Towards a rational use of water in greenhouse agriculture and sustainable architecture"; *Desalination*, 211(1-3); pp. 296-303.

## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA APLICADO A HORTICULTURA PROTEGIDA

M. Asunción Antón Vallejo  
IRTA

### RESUMEN

Se presenta en este capítulo una descripción de la herramienta ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, ACV, enfocada a su uso en horticultura. De acuerdo con la normativa ISO 14040 un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, inventario, análisis del impacto e interpretación. Se analiza cada una de estas fases para seguidamente realizar un repaso de los principales estudios, realizados hasta fecha, de utilización de dicha herramienta en la evaluación ambiental de la producción en invernadero. A partir de dichos estudios se extraen unas conclusiones donde se destacan los principales problemas ambientales de los invernaderos mediterráneos. Asimismo se detallan los aspectos metodológicos de la herramienta ambiental, ACV, que requieren futura investigación.

### SUMMARY

*This chapter provides a description of the environmental tool Life Cycle Assessment, LCA, focused on their use in horticulture. According to ISO standardisation guidelines a LCA study can be divided into four steps: goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation. Each one of these steps is analysed. Then follows a review of major studies conducted to date, which use this tool in the environmental assessment of greenhouse production. It ends with a conclusion which highlights the main environmental problems in Mediterranean greenhouses arising from these studies. In addition methodological issues of the environmental tool, LCA, which require further research, are detailed.*

## 1. Introducción

La agricultura, como toda actividad humana, implica una explotación del medio natural. En concreto, la agricultura intensiva pretende producir el máximo con la menor ocupación posible del suelo, para ello se recurre a una serie de técnicas con el objetivo de forzar la producción. Un ejemplo de este tipo de producción lo tenemos en el cultivo bajo invernadero. Éste se orienta a obtener el más alto rendimiento, a costa de aislarlo de las condiciones naturales mediante el forzado del cultivo a través de técnicas de climatización (calefacción, humidificación, iluminación,...) y técnicas culturales (sustratos, fertirrigación,...) para rentabilizar al máximo la ocupación del terreno. Esta rentabilización implica una mejora en la utilización de los recursos naturales, agua y suelo.

Entre la sociedad puede existir una opinión generalizada de que los productos procedentes de este tipo de agricultura intensiva, son perjudiciales para el medio ambiente. Para poder valorar la calidad ambiental de un producto deberán establecerse unos parámetros transparentes, cuantificables y objetivos al máximo. Estos parámetros deberán incluir aspectos como el consumo de recursos bióticos y abióticos, consumo de energía, uso del suelo, emisiones nocivas al aire, agua y suelo y toxicidad potencial para los seres humanos y ecosistemas. Esto supone aceptar que la calidad ambiental de un producto no se puede definir con un solo parámetro, sino con una serie de valores o indicadores que el usuario y/o la administración deberán priorizar.

La metodología propuesta por el análisis del ciclo de vida, ACV, que tiene en cuenta los procesos de forma global, resulta una herramienta muy adecuada, puesto que una buena gestión ambiental implica una acción integrada sobre los posibles daños ambientales.

Los análisis de ciclo de vida (ACV) se desarrollaron, en un principio, para el estudio de procesos industriales. Dentro de la industria, los ACV se han empleado, tradicionalmente, en el desarrollo de productos menos contaminantes. También se han utilizado para mejorar la política ambiental de la empresa. Asimismo, resulta un instrumento eficaz en el desarrollo de los criterios necesarios para el ecoetiquetaje (Milà i Canals, 2003).

Su aplicación a la agricultura requiere la aplicación sistemática de los métodos existentes así como nuevos métodos (Cowell *et al.*, 1997). A escala europea se han realizado algunos proyectos de adaptación de la metodología del ACV a la agricultura. Mediante la acción concertada "*Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment*

*for Agriculture*” (Audsley, 1997) se investigó como el ACV puede ser aplicado a la producción agraria, estableciendo las primeras pautas para su aplicación en agricultura e identificando las dificultades metodológicas que requieren una investigación más profunda.

## 2. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis del ciclo de vida, ACV (Life Cycle Assessment, *LCA* en nomenclatura inglesa), estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad.

El ciclo de vida de un producto considera toda la “historia” del mismo, desde su origen como materia prima hasta su final como residuo. Se tienen en cuenta todas las fases intermedias como transporte y preparación de materias primas, manufactura, transporte a mercados, distribución, uso, etc.

En un ACV completo se atribuyen a los productos todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando éste se consume o ya no se puede utilizar.

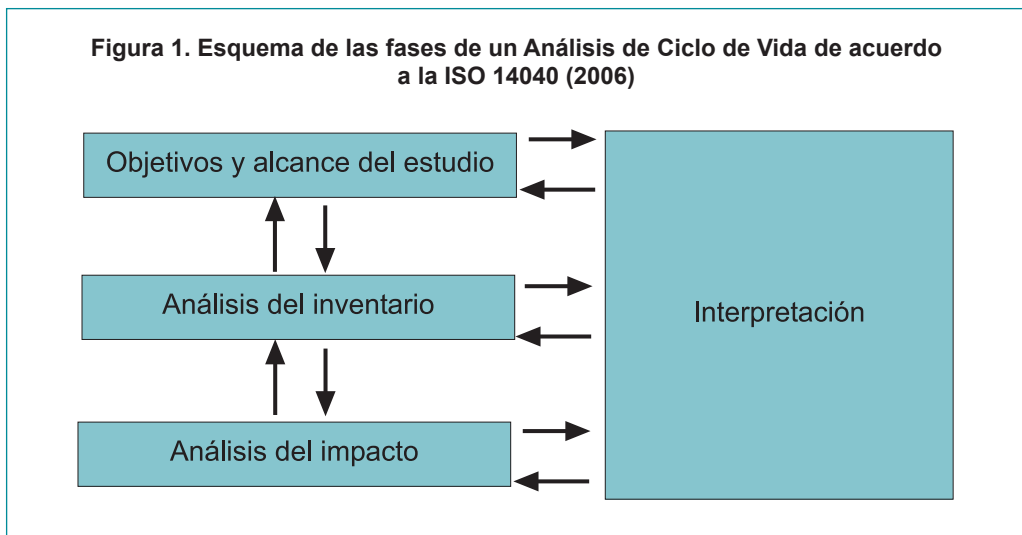
El ACV consiste por tanto en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida. Las categorías generales de impactos medioambientales que precisan consideración incluyen el uso de recursos, la salud humana y la repercusión sobre los ecosistemas.

La complejidad del ACV requiere un protocolo al cual deberá ajustarse todo estudio de ACV. Dicho protocolo se haya establecido en la normativa elaborada por “International Standards Organisation”, ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). En Marzo de 2010 esta normativa se ha visto complementada con la guía del ILCD, Internacional Reference Life Cycle Data system. Esta guía pretende homogeneizar las diferentes opciones metodológicas, con el objetivo de obtener unos resultados más precisos en calidad y consistencia ILCD (2010).



De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040 un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación.

Tal y como ilustra la figura 1 estas cuatro fases no son simplemente secuenciales. El ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.



## 2.1. Objetivo y alcance del estudio

En esta fase se define el tema de estudio y se incluyen los motivos que llevan a realizarlo. También, en esta fase, se establece la unidad funcional. La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado. Un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios y/o cantidades de producto que lleven a cabo la misma función.

En los sistemas agrícolas, y desde el punto de vista del productor, la principal función es la producción de alimentos (Audsley, 1997). En estos casos, normalmente se considera como unidad funcional un kilo de producto fresco, por ejemplo kg de tomates. Otras posibles unidades funcionales pueden ser superficie cultivada, beneficio económico y/o propiedades nutritivas. Esta última estaría más justificada desde el punto de vista del consumidor, su utilización sería seguramente más apropiada para estudios de dietas

que para procesos agrícolas propiamente dichos. Por tanto, dependiendo del objetivo del estudio se definirá la unidad funcional, obedeciendo siempre a los requerimientos de transparencia y objetividad. El uso de la producción como unidad funcional favorecerá aquellos sistemas más eficientes, que con menos recursos obtengan más rendimiento, por tanto en el caso de comparaciones el uso de más de una unidad funcional puede ser especialmente recomendable.

La unidad funcional proporciona una referencia respecto a la cual las entradas y salidas del sistema pueden ser normalizadas en un sentido matemático.

Debido a su naturaleza global un ACV completo puede resultar extensísimo. Por esta razón se deberán establecer unos límites que deberán quedar perfectamente identificados y justificados. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV. Varios factores determinan los límites del sistema, incluyendo la aplicación prevista del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión, los datos y limitaciones económicas y el destinatario previsto.

## 2.2. Inventario (ICV)

Esta fase comprende la obtención de datos correspondientes a los consumos (de materia y energía) y a las emisiones de cada una de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto; así como los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional. De una forma genérica denominaremos estos efectos ambientales como “carga ambiental”. Ésta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. Cuando se trabaje con sistemas que impliquen varios productos, en esta fase se procederá a asignar los flujos de materia y energía así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto.

Para la realización del inventario se recogen normalmente datos de campo propios del sector o de la/s finca/s que se pretenden analizar, denominados datos primarios, propios de las etapas principales y datos genéricos (normalmente a partir de una base de datos o estadísticas) para las etapas secundarias, datos secundarios.

Entre otros datos primarios será necesario disponer de los datos correspondientes a fertilizantes empleados, labores culturales y correspondientes horas de utilización del tractor, plaguicidas empleados, potencia de las bombas y horas de funcionamiento de riego, agua aplicada, sustratos, materiales empleados en los equipamientos, en las infraestructuras, transporte, material de cosecha, etc. Los datos secundarios corresponderán a recursos empleados y emisiones producidas en los procesos de fabricación de fertilizantes, plásticos, acero o producción de electricidad, por ejemplo.

### 2.3. Análisis del Impacto (AICV)

El propósito de esta fase es la evaluación de los impactos que estos consumos y emisiones pueden provocar sobre el medio ambiente. En esta fase se trata de convertir la información obtenida en el inventario en una información interpretable. A partir de los numerosos valores de intervención ambiental (emisiones, recursos consumidos, etc.) obtenidos en el inventario, se pasa a analizar cómo estas intervenciones afectan al medio ambiente. La estructura de esta fase viene determinada por las normativas ISO 14040 (2006) y 14044 (2006), distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales.

Los elementos considerados obligatorios son:

1. **Selección** de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.
2. **Clasificación.** En esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.
3. **Caracterización.** Consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto.

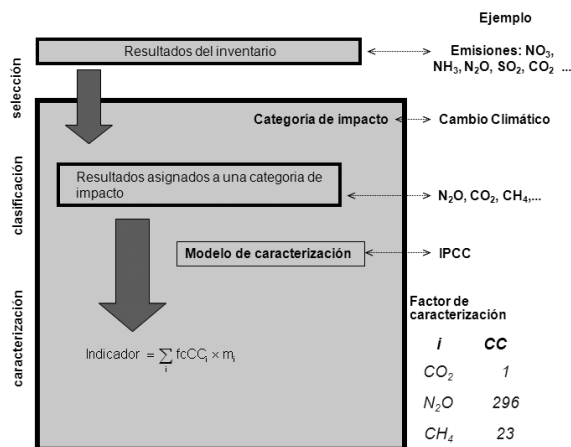
Cada categoría de impacto, p.e. cambio climático, precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría, p.e. emisión de dióxido de carbono equivalente. A partir de los datos recogidos en el inventario se seleccionan aquellos que

tienen efecto sobre la categoría estudiada (p.e. emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, en el caso de cambio climático). La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría. Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales se convierten a unidades del indicador, (p.e. 23 kg CH<sub>4</sub> equivale a 1 kg de CO<sub>2</sub>). Es necesario el uso de modelos para obtener estos factores de caracterización; en el caso del cambio climático se utiliza el modelo desarrollado por el IPCC (2007). La Figura 2 esquematiza dicho procedimiento.

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio de ACV:

1. **Normalización.** Se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto un valor de referencia, ya sea a escala geográfica y/o temporal.
2. **Agrupación.** Clasificación y posible catalogación de los indicadores.

Figura 2. Esquema de la etapa de análisis del impacto de ciclo de vida, adaptación ISO 14040 (2006)



3. **Ponderación.** Consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.
  
4. **Análisis de calidad de los datos,** ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del AICV. Se considerará obligatorio en análisis comparativos. Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental, “endpoint”, o bien, considerar los efectos intermedios, “midpoints”. Las categorías de impacto ambiental intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo, en general, modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención. Éstas proporcionan una información más detallada sobre de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Las categorías de impacto finales son variables que afectan directamente a la sociedad, en las tres Áreas de Protección (AoP) ambientales consideradas: salud humana, ecosistemas y recursos naturales (ILCD, 2010), por tanto su elección resultaría más relevante y comprensible a escala global. Sin embargo, la metodología para llegar a cuantificar el efecto último no está plenamente elaborada ni existe el suficiente consenso científico necesario para recomendar su uso.

## 2.4. Interpretación

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cuál presenta un mejor comportamiento ambiental.

Esta etapa debe incluir también una valoración del propio estudio de ACV, que considerará la calidad de los datos empleados, la unidad funcional definida y la validez de los límites establecidos.

### 3. Resultados de estudios de ACV en cultivo en invernadero

En la última década se ha utilizado esta herramienta ambiental, ACV, con el objetivo de evaluar los daños ambientales atribuibles al proceso de cultivo de tomate bajo invernadero a lo largo de su ciclo de vida, es decir, desde los orígenes de las materias primas utilizadas hasta el final de los residuos generados.

Los trabajos publicados hasta la fecha muestran conclusiones claramente diferentes, en función de si los estudios se llevan a cabo en el clima frío o cálido. En los países del Norte con un clima frío, la calefacción y la iluminación han sido señalados como los principales problemas ambientales. En los países del Sur, donde las necesidades de energía son más bajas, y la calefacción de invernaderos prácticamente inexistente, los fertilizantes y las estructuras han mostrado el mayor impacto.

El trabajo de Jolliet (1993) puede considerarse como el primer trabajo, que tiene en cuenta el ciclo de vida de la producción de tomate, para la evaluación de varios sistemas de producción en invernadero en Suiza. En él se valoran varias técnicas de cultivo en invernadero: calefacción, iluminación artificial y fertilización carbónica, cuantificando así mismo el transporte hasta el punto de consumo. Los resultados muestran que la calefacción y la iluminación son las técnicas que producen mayor impacto ambiental, resultando menos contaminante la producción en el Sur, que incluye un transporte de 2.000 km hasta el punto de consumo. Van Woerden (2001) aplica ACV a la horticultura de invernaderos holandesa para describir los efectos ambientales de la evolución futura de los sistemas de producción comparando cultivo orgánico y convencional. También, en este trabajo se muestra, una vez más, el impacto negativo del uso de calefacción, responsable aproximadamente del 75 % del impacto ambiental total de este cultivo. Cabe considerar también la contribución de la estructura del invernadero, superior al 10 %.

En la evaluación ambiental de los invernaderos en el Mediterráneo, Antón (2004) muestra que son la estructura del invernadero, acero y plástico, el consumo de fertilizantes, la gestión de los residuos y el uso de sustratos los aspectos más importantes desde un punto de vista ambiental.

Medina *et al.* (2006) utilizan la metodología de ACV para dar una visión general de los costos de energía y las cargas asociadas a la producción de tomate de invernadero en la Sabana de Bogotá (Colombia). El resultado más relevante de este estudio es el bajo

consumo energético ( $1,11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) asociado al bajo nivel de tecnología utilizada. Asimismo, estos autores señalan el uso ineficiente de fertilizantes de nitrógeno y uso del agua y la necesidad de mejorar las estructuras de los invernaderos mediante el incremento del nivel tecnológico para mejorar la producción.

En contraste con este bajo valor, el estudio de Williams *et al.* (2006) identifica las necesidades de la demanda de energía para cultivar tomates en Inglaterra,  $125 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . En un estudio posterior, (Williams *et al.*, 2008), este mismo autor comparó tomate producido en el Reino Unido y España dando valores de  $36$  y  $8,7 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  respectivamente; el dato correspondiente a España incluye el transporte desde el Sur de España a Reino Unido, resultados acordes a las conclusiones expuestas en el trabajo previamente citado de Jolliet (1993).

Pese a que no es propiamente un trabajo de ACV, el documento citado extensamente de Stanhill (1980) también proporciona valores similares,  $7 \text{ Mj} \cdot \text{kg}^{-1}$  para un invernadero sin calefacción en Israel con un rendimiento de  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  y  $137 \text{ Mj} \cdot \text{kg}^{-1}$  en invernadero con calefacción en el sur de Inglaterra, con un rendimiento de  $21,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , que se puede considerar una baja producción.

Relacionados con las estructuras de los invernaderos hay algunos estudios que muestran que las estructuras más complejas de aluminio y vidrio tienen un impacto ambiental mayor que el de las estructuras de tipo multitúnel de acero y plástico, que a su vez es mayor que el de las estructuras más sencillas (madera y plástico) (Russo *et al.*, 2004). En un estudio llevado a cabo en las Islas Canarias (Torrellas *et al.*, 2008), muestran que en un invernadero multitúnel, la producción debería doblar a la del invernadero parral, con el fin de justificar dicha inversión desde un punto de vista ambiental.

Otro punto ampliamente estudiado es el uso de sustratos y recirculación y comparación de los cultivos con y sin suelo. Se ha demostrado que mientras que algunas categorías de impacto, como la eutrofización mejoran claramente en los sistemas cerrados, otros, como el agotamiento de recursos no renovables, aumentan debido a la mayor cantidad de material utilizado en los cultivos hidropónicos, especialmente el sustrato (Antón, 2004). Sin embargo, este punto depende en gran medida de la unidad funcional seleccionada, en este caso el rendimiento (Nienhuis *et al.*, 1996) aplican el ACV para el estudio de la nutrición en cultivo de tomates y de rosas en Holanda comparando cultivo sin suelo, en sustrato libre y en sustrato con recirculación, destacando la importancia de este último en aspectos como la reducción de la eutrofización.

Romero-Gómez *et al.* (2009) comparan las cargas ambientales de cultivo de judías verdes en sistemas de sombreo con y sin sistema de humidificación con el cultivo al aire libre. En el primer caso la utilización de las estructuras quedaría justificada ambientalmente con rendimientos superiores en un 15 %. Sin embargo, la adopción de sistemas de enfriamiento, tales como humidificadores (con un alto consumo de agua y electricidad), sólo se justificaría en las condiciones de estudio, si el rendimiento aumentará en un 60 %.

Un proyecto europeo reciente EUPHOROS (2008-2012) ha utilizado el ACV para analizar extensivamente los aspectos ambientales de cuatro escenarios europeos de referencia y estudiar alternativas de mejora. Estos cuatro escenarios son tomate producido en invernadero multitúnel en Almería, tomate producido en invernadero Venlo en Holanda y Hungría y cultivo de rosa cultivado en invernadero Venlo en Holanda. Mientras que para los tres últimos el consumo de energía es el aspecto prioritario, en el caso del invernadero mediterráneo, de manera global se observa que los subsistemas de producción de los diferentes materiales de la estructura y equipo auxiliar y la fabricación de los fertilizantes, resultan las fases con mayor impacto ambiental.

El estudio de diferentes alternativas como reducción de fertilizantes, reducción del volumen de sustrato, prolongación de la vida útil del invernadero y el aumento del uso de energías renovables puede permitir reducir entre un 17 y 30 % el impacto del cultivo de tomate para las categorías de impacto ambientales estudiadas.

#### **4. Conclusiones: aplicación ACV en invernadero Mediterráneo**

En esta sección se presentan una serie de conclusiones por lo que respecta al análisis ambiental del cultivo en invernadero. Además, se resumen aquellos aspectos de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida que requieren profundizar en su estudio para mejorar su aplicación en agricultura en general y a la horticultura protegida en particular.



## 4.1. Análisis ambiental del cultivo en invernadero

Cabe señalar la importante contribución que el equipamiento de infraestructura tiene sobre la mayor parte de las categorías ambientales. Estos resultados, que contrastan con los sistemas de producción industrial, en los que el impacto del equipamiento es prácticamente despreciable, están en concordancia con los resultados de Cowell (1998). Las razones las podríamos encontrar, por un lado, en las características del material utilizado para la construcción del invernadero, material con un tiempo de vida útil relativamente pequeño en comparación con las fábricas de los procesos industriales, y por otro, en que el cultivo en sí requiere un consumo energético relativamente pequeño y a intervalos irregulares, comparando otra vez con sistemas industriales de producción continua. No cabe olvidar tampoco que la principal fuente de energía en la producción de tomate en el invernadero es la energía solar. Aspectos como alargar la vida útil, el uso de materiales reciclados y reciclaje de residuos son factores importantes a considerar.

El subsistema de fertilizantes es otro de los temas susceptibles de mejora ambiental. La reducción del uso de éstos pasa por el ajuste entre el aporte y el consumo, así como el empleo de sistemas de recirculación. Actualmente, para evitar deficiencias nutritivas o acumulación de excesos salinos, se suelen realizar aportes excesivos de fertilizantes y agua. Deberán buscarse criterios de gestión más racional es en el suministro de nutrientes al cultivo con el propósito de reducir el impacto ambiental y de aumentar el aprovechamiento de un recurso escaso, como es el agua.

La gestión de los residuos debe considerarse prioritaria en la mejora ambiental del cultivo en invernadero. La separación de la fracción verde y su posterior compostaje constituye una importante reducción de la carga ambiental. Igualmente deberá reducirse la cantidad de residuo que se genera, bien mediante su reciclado o bien a través de su reutilización.

Cabe destacar la contribución que el substrato (p.e. perlita o lana de roca), puede presentar para alguna de las categorías de impacto. Procede la recomendación de investigación en sustratos alternativos de origen local y preferiblemente procedentes de reutilización de algún material.

Una gran parte de estas propuestas ya son contempladas en la mayoría de las políticas agrarias actuales, la herramienta presentada nos permitirá evaluar hasta qué punto estas mejoras pueden o han contribuido a reducir el impacto ambiental.

## 4.2. Aspectos metodológicos que requieren investigación

Como se ha visto el ACV es una metodología relativamente reciente, especialmente en su aplicación en el sector agrícola. Queda mucho camino por recorrer, pero el perfeccionamiento de esta herramienta y la difusión de sus resultados pueden ser de gran utilidad en el alcance de la sostenibilidad de nuestra agricultura.

Sin embargo, cabe aclarar que la utilización de la metodología del ACV significa asumir una serie de simplificaciones que deberán tenerse en cuenta, debiéndose profundizar en su metodología.

A nivel de inventario los principales problemas se detectan en la necesidad de adaptar a nuestras condiciones, los modelos o cálculos de emisiones elaborados para otras regiones. Dada la importancia de dichos cálculos, se precisaría de un perfeccionamiento de los modelos de transporte, deposición atmosférica, lixiviación, etc., en función de las condiciones locales, terreno, clima, dosis riego, fertilizantes y plaguicidas. Asimismo, no se dispone de toda la información referente a los datos secundarios necesarios, la dependencia de bases de datos internacionales nos puede dar valores aproximados, cuando en realidad pueden resultar cruciales para el estudio. En este sentido la disponibilidad de bases de datos locales o nacionales sería un objetivo muy importante para la credibilidad de los estudios de ACV.

Todavía están en fase de desarrollo factores de caracterización para categorías de impacto, tales como toxicidad, uso del suelo y uso del agua para las cuales no existe una metodología consensuada y que, sin embargo, son impactos propios de los sistemas agrícolas, dado que actualmente se está investigando en ellos (LC-IMPACT 2009-2012), hace prever resultados en un futuro inmediato.

Por último, cabe insistir en un aspecto que aunque recogido en la normativa, debería aplicarse más a menudo, como es la presentación de resultados con el correspondiente análisis de sensibilidad e incertidumbre, así como en el consenso de un sistema de referencia para presentar los resultados normalizados, cosa que permitiría no tan sólo saber cuáles son los aspectos ambientales débiles de nuestro sistema, sino también conocer su gravedad.

## Referencias bibliográficas

- Antón, A. (2004): *Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Ph Thesis. <http://tdx.cat/handle/10803/6827>.
- Audsley, E. (1997): *Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture*. European Commission DG VI Agriculture.
- Cowell, S. J. (1998): *Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: Integration Into Decision-Making*. Guildford. University of Surrey. Ph Thesis.
- Cowell, S. J. y Clift, R. (1997): "Impact assessment for LCAs [Life Cycle Assessments] involving agricultural production"; *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2(2); pp. 99-103.
- Euphoros, (2008-2012): Efficient use of inputs in protected horticulture. Seventh Framework Programme Theme KBBE-2007-1-2-04 <http://www.euphoros.wur.nl>.
- ILCD, (2010): *International Reference Life Cycle Data System Handbook*. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. <http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Paris. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISO-14040, (2006): *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*. Geneva. International Organisation for Standardisation ISO.
- ISO-14044, (2006): *Environmental management —Life cycle assessment— Requirements and guidelines*. Geneva. International Organisation for Standardisation ISO.
- Jolliet, O. (1993): "Bilan écologique de la production de tomates en serre"; *Revue S. Vitic. Arboric. Hortic.* 25(4); pp. 261-267.

- Lc-Impact (2009-2012): *Life Cycle Impact assessment Methods for imProved sustAinability Characterisation of Technologies*. Seventh Framework Programme Environment Env.2009.3.3.2.1 <http://www.lc-impact.eu/>.
- Medina, A.; Parrado, C. A.; Cooman, A. y Scherevens, E. (2006): "Evaluation of energy use and some environmental impacts for greenhouse tomato production in the high altitude tropics. Models for Plant Growth, Environmental Control & Farm Management in Protected Cultivation"; *Hortimodel 2006*. Wageningen (Netherlands). ISHS. *Acta Horticulturae*, (718); pp. 415-421.
- Milà I Canals, L. (2003): *Contributions to Life Cycle Analysis for Agricultural Systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment*. Bellaterra. Universitat Autònoma. Ph Thesis.
- Nienhuis, J. K.; Vreede, P. J. A. D.; De Vreede, P. J. A. y Brumfield, R. G. (1996): "Utility of the environmental life cycle assessment method in horticulture"; *Proceedings of the XIII<sup>th</sup> International Symposium on Horticultural Economics*, Rutgers. New Brunswick, New Jersey, USA. (429); pp. 531-538.
- Romero-Gámez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E. y Castilla, N., (2009): "Environmental impact of greenbean cultivation: Comparison of screen greenhouses vs. open field"; *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(3,4); pp. 132-138.
- Russo, G. y Scarascia-Mugnozza, G. (2004): "LCA methodology applied to various typologies of greenhouses"; *International Conference on Sustainable Greenhouse Systems - GREENSYS 2004*; Leuven, Belgium, ISHS. *Acta Horticulturae*, (691); pp. 837-844.
- Stanhill, G. (1980): "The energy cost of protected cropping: A comparison of six systems of tomato production"; *Journal Agricultural Engineering Research*, (25); pp.145-154.
- Torrellas, M.; De León, W.; Raya, V.; Montero, J.; Muñoz, P.; Cid, M. y Antón, A. (2008): "LCA and tomato production in the Canary Islands"; *The 8th International Conference on EcoBalance*. Tokyo, Japan. Institute of Life Cycle Assessment. p. 41.

- Van Woerden, S. (2001): “The application of Life Cycle Analysis in glasshouse horticulture”; *International Conference LCA in Foods*. Gothenburg, Sweden. pp. 136-140.
- Williams, A.; Pell, E.; Webb, J.; Moorhouse, E. y Audsley, E. (2008): “Consumption of fresh produce in the UK from Mediterranean countries and the UK”; *The 8th International Conference on EcoBalance*. Tokyo, Japan.
- Williams, A. G.; Audsley, E. y Sandars, D. L. (2006): *Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities*. Bedford. Cranfield University and Defra; <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk> and [www.defra.gov.uk](http://www.defra.gov.uk).



