

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA**



**EVALUACIÓN MICROCLIMÁTICA, AGRONÓMICA Y  
AMBIENTAL DE UN CULTIVO BAJO MALLA.  
CARACTERIZACIÓN RADIATIVA EN MALLAS**

**MERCEDES ROMERO GÁMEZ  
TESIS DOCTORAL  
GRANADA, DICIEMBRE 2010**

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Mercedes Romero Gámez  
D.L.: GR 1347-2011  
ISBN: 978-84-694-1068-4





**UNIVERSIDAD DE GRANADA**



**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVALUACIÓN MICROCLIMÁTICA, AGRONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN CULTIVO  
BAJO MALLA. CARACTERIZACIÓN RADIATIVA EN MALLAS**

por

Mercedes Romero Gámez

Memoria de Tesis Doctoral presentada para aspirar al grado de Doctor

Fdo. Mercedes Romero Gámez  
Licenciada en Química

Granada, Diciembre 2010

**Directoras de la Memoria,**

Fdo. Dra. María Teresa Soriano Vallejo  
Investigadora titular  
del IFAPA

Fdo. Dra. Elisa María Suárez Rey  
Investigadora titular  
del IFAPA

Fdo. Dra. Ana María García Campaña  
Catedrática y Prof. Titular del Dpto. de Química Analítica.  
Universidad de Granada



El trabajo que se presenta en esta memoria de Tesis Doctoral ha sido realizado en el Grupo de Investigación "Calidad en Química Analítica, Alimentaria, Ambiental y Clínica" (FQM-302) del Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada (España) y en el Grupo de Investigación "Horticultura: Agronomía y Protección Vegetal" (AGR112) del Grupo de Horticultura del Área de Producción Agraria del Instituto de Investigación Agraria y Pesquera (IFAPA Camino de Purchil, Granada). Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto nº: INIA-RTA 2006-00062-00-00 (Cultivo bajo mallas en comarcas no litorales económicamente deprimidas: Evaluación agronómica, económica y ambiental).

---



A mis padres



“Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto,  
y pensar lo que nadie más ha pensado”

*Albert Szent-Györgi (1893-1986)*





## INDICE

---



INTRODUCCIÓN GENERAL .....	3
BIBLIOGRAFÍA .....	9
FASE I: EVALUACIÓN MICROCLIMÁTICA, AGRONÓMICA Y AMBIENTAL DEL CULTIVO DE JUDÍA VERDE BAJO MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN	
CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN MICROCLIMÁTICA DE UN INVERNADERO DE MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN. COMPARACIÓN CON EL EXTERIOR	
1. INTRODUCCIÓN .....	19
2. OBJETIVO .....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
3.1. Localización .....	26
3.2. Descripción de las parcelas de ensayo .....	26
3.2.1. Invernadero de malla .....	26
3.2.2. Parcela al aire libre .....	29
3.3. Estudio microclimático .....	30
3.4. Calendario .....	31
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	32
4.1. Radiación .....	32
4.2. Clorofila .....	34
4.3. Temperatura del aire .....	36
4.4. Déficit de presión de vapor (DPV) .....	40
4.5. Temperatura de suelo .....	46
4.6. Temperatura de hoja .....	48
5. CONCLUSIONES .....	51
6. BIBLIOGRAFÍA .....	53
CAPÍTULO 2. COMPARACIÓN AGRONÓMICA Y PRODUCTIVA DE UN CULTIVO DE JUDÍA VERDE BAJO MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN EN ÉPOCA PRIMAVERO-ESTIVAL	
1. INTRODUCCIÓN .....	63
1.1. Judía verde ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.) .....	63
1.1.1. Morfología .....	63
1.1.2. Requerimientos edafológicos .....	64
1.1.2.1. Temperatura .....	64
1.1.2.2. Humedad .....	65
1.1.2.3. Radiación .....	66
1.1.2.4. Suelo .....	66

1.1.3. Material vegetal .....	66
1.1.4. Mejora genética .....	67
1.1.5. Agronomía del cultivo .....	68
1.1.6. Superficie, producción y valor de la judía verde al aire libre y bajo abrigo .....	69
1.1.7. Valor nutricional .....	71
1.1.8. Deficiencias y toxicidad .....	71
1.1.9. Plagas y enfermedades .....	72
1.2. El cultivo protegido de judía verde .....	73
2. OBJETIVO .....	76
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	77
3.1. Localización .....	77
3.2. Estructura del invernadero de malla y parcela al aire libre .....	77
3.3. Tratamientos y diseño estadístico .....	77
3.4. Agronomía del cultivo .....	78
3.4.1. Material vegetal .....	79
3.4.2. Características del suelo .....	79
3.4.3. Características del agua .....	80
3.4.4. Riego .....	81
3.4.5. Abonado .....	82
3.4.6. Tratamientos fitosanitarios y control integrado .....	83
3.5. Análisis de producción .....	84
3.6. Análisis de crecimiento .....	84
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	86
4.1. Análisis de producción .....	86
4.1.1. Producción total y comercial acumulada por orientaciones .....	86
4.1.1.1. Ciclo 2008 .....	86
4.1.1.2. Ciclo 2009 .....	89
4.1.2. Producción total y comercial acumulada por sistemas de cultivo .....	91
4.1.2.1. Ciclo 2008 .....	91
4.1.2.2. Ciclo 2009 .....	93
4.1.3. Producción final total y comercial acumulada por sistemas de cultivo .....	95
4.2. Análisis de crecimiento .....	96
4.2.1. Índice de área foliar (LAI) .....	98
4.2.2. Área foliar específica (SLA) .....	101
4.2.3. Biomasa (CDW) .....	102
4.3. Consumo y eficiencia hídrica .....	104
5. CONCLUSIONES .....	108
6. BIBLIOGRAFÍA .....	109

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR EL CULTIVO BAJO MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV). COMPARACIÓN CON CULTIVO AL AIRE LIBRE

1. INTRODUCCIÓN .....	119
1.1. Definición del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) .....	119
1.2. Metodología .....	120
1.3. El ACV y la agricultura .....	122
1.4. El ACV y la agricultura intensiva protegida .....	124
1.5. Planteamiento .....	126
2. OBJETIVO .....	128
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	129
3.1. Alcance del estudio .....	129
3.2. Unidad funcional .....	129
3.3. Sistemas estudiados .....	130
3.4. Límites de los sistemas .....	134
3.4.1. Límites geográficos .....	134
3.4.2. Límites temporales .....	134
3.4.3. Aspectos excluidos del ACV .....	136
3.5. Datos utilizados .....	136
3.6. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) .....	137
3.6.1. Infraestructura .....	138
3.6.1.1. Estructura del invernadero de malla .....	138
3.6.1.2. Sistema de nebulización .....	141
3.6.1.3. Estructura de la parcela al aire libre .....	142
3.6.1.4. Sistema de fertirrigación .....	144
3.6.2. Ciclo de cultivo .....	144
3.6.2.1. Fertilizantes y Fertirrigación .....	145
3.6.2.2. Gestión de la nebulización .....	148
3.6.2.3. Gestión del cultivo .....	148
3.6.2.4. Control fitosanitario .....	149
3.6.2.5. Residuos .....	150
3.7. Análisis del impacto del ciclo de vida (AICV) .....	151
3.7.1. Agotamiento de recursos abióticos (AR) .....	151
3.7.2. Acidificación (AI) .....	152
3.7.3. Eutrofización (EI) .....	153
3.7.4. Calentamiento global (GWP) .....	154
3.7.5. Degradación del ozono estratosférico (ODP) .....	155
3.7.6. Toxicidad humana (HT) .....	156
3.7.7. Oxidación fotoquímica (PO) .....	157
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	158
4.1. Análisis individual de los impactos de cada sistema de cultivo .....	158
4.1.1. Sistema de cultivo al Aire Libre (AL) .....	159

4.1.2. Sistema de cultivo bajo invernadero de malla (M) .....	164
4.1.3. Sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización (MN) .....	168
4.2. Análisis individual de los subsistemas evaluados .....	173
4.2.1. Infraestructura .....	173
4.2.2. Control Fitosanitario .....	175
4.2.3. Fertilizantes .....	176
4.2.4. Fertirrigación .....	177
4.2.5. Gestión del Cultivo y Residuos .....	177
4.2.6. Gestión de la Nebulización .....	178
4.3. Comparación de los tres sistemas de cultivo .....	179
5. CONCLUSIONES .....	182
6. BIBLIOGRAFÍA .....	184

## FASE II: CARACTERIZACIÓN DE MALLAS Y MODELIZACIÓN DE ESTRUCTURAS PARA MALLAS

### CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN TRANSMISIVA A RADIACIÓN SOLAR DE MATERIALES DE CUBIERTA Y CERRAMIENTO PARA INVERNADEROS DE MALLA

1. INTRODUCCIÓN .....	197
1.1. Mallas plásticas .....	197
1.2. La radiación solar .....	199
1.3. Transmisividad a la radiación solar de las mallas plásticas .....	201
2. OBJETIVOS .....	206
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	207
2.1. Bastidor .....	207
2.2. Procedimiento de medida .....	209
2.3. Localización e instrumental radiométrico .....	212
2.4. Tipos de mallas y ángulos de incidencia .....	214
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	216
4.1. Curvas características de los materiales para la radiación solar global y PAR y cociente entre la radiación difusa bajo malla (DIFi) y la radiación difusa exterior (DIFo) .....	216
4.2. Transmisividad a radiación solar global y PAR y cocientes entre radiación difusa bajo la malla y radiación difusa en el exterior (DIFi/DIFo) .....	221
4.3. Estudio comparativo del comportamiento de las mallas caracterizadas para la radiación solar global, PAR y difusa .....	225
5. CONCLUSIONES .....	231
6. BIBLIOGRAFÍA .....	233

CAPÍTULO 5. VALIDACIÓN DEL MODELO TRADESMA PARA EL CÁLCULO DE TRANSMISIVIDAD A LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA EN ESTRUCTURAS DE MALLAS

1.INTRODUCCIÓN .....	243
2.OBJETIVOS .....	247
3.MATERIALES Y MÉTODOS .....	248
3.1. Obtención del modelo TRADESMA a partir del modelo TRADINMED .....	248
3.1.1. Transmisividad del material de cubierta, $\tau_{MAT}$ .....	248
3.1.2. Transmisividad de los elementos estructurales longitudinales ( $\tau_{EL}$ ) y transversales ( $\tau_{ET}$ ) .....	251
3.1.3. Integración de la transmisividad a lo largo del día .....	251
3.2. Programa informático .....	252
3.3. Maquetas a escala .....	254
3.3.1. Estructura .....	254
3.3.2. Cubierta .....	255
3.3.3. Orientación .....	255
3.3.4. Mantenimiento .....	256
3.4. Medida de la radiación en las maquetas .....	256
3.5. Cálculo de transmisividad y comparación de resultados .....	257
4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	259
4.1. Validación del modelo .....	259
4.1.1. Comparación gráfica de valores medio-horarios de transmisividad medidos y simulados .....	259
4.1.2. Cuantificación numérica del ajuste entre valores medio-horarios de transmisividad medidos y simulados .....	265
4.1.3. Comparación de la transmisividad media ponderada diaria calculada a partir de los valores medidos y simulados .....	266
4.1.4. Discusión de la validación del modelo TRADESMA .....	268
4.2. Comparación de la transmisividad a radiación global obtenida para las pendientes y orientaciones de cubierta de las maquetas estudiadas .....	272
5. CONCLUSIONES .....	274
6. BIBLIOGRAFÍA .....	275



## INTRODUCCIÓN GENERAL

---





# Introducción general

El uso de mallas es habitual en invernaderos plásticos del área mediterránea para cubrir las ventanas y así evitar la entrada de insectos vectores de enfermedades causantes de la pérdida, a veces completa, de producción. La utilización de mallas resulta ser muy eficiente frente a determinados tipos de insectos en función de la porosidad del material (Giordano y col., 2003). Estas mismas mallas comenzaron a utilizarse como material de cerramiento de invernaderos.

La aplicación de mallas como cubiertas en invernaderos se introdujo en los años setenta del siglo pasado por Rossel y Ferguson (Desmarais y Raghavan, 1997; Möller y col., 2004). Aunque se puede encontrar información sobre los invernaderos de malla o “umbráculos” hace ya 20 años (cultivo de pimientos en Israel o col china en Taiwán) y su utilización ha sido frecuente en viveros para proteger las plántulas del exceso de temperatura primaveral y estival (Sajjapongse y Roan, 1983; Rylski y Spigelman, 1994), hasta años recientes no se ha producido una expansión de los mismos, tanto en el sureste de España como en otros países mediterráneos (Möller y col., 2003). Así, el agrosistema “invernadero de malla” es una tecnología prometedora en muchos países de clima templado, tropical y subtropical, así como en regiones áridas y semiáridas (Tanny, 2010) como México, Italia, Israel o España. En el caso de España, la expansión de los invernaderos de malla en comarcas interiores de diversas regiones españolas podría favorecer el desarrollo económico de las mismas, especialmente en aquellas zonas en las que se aprecia falta de opciones de desarrollo y un claro desequilibrio con las regiones costeras, de mejores condiciones climatológicas y con un alto potencial de crecimiento económico. El sector de la hortofruticultura protegida debe ser considerado un importante motor en la economía agraria de la Comunidad Andaluza, y merece un

gran esfuerzo en investigación para mejorar su rentabilidad, con el aprovechamiento máximo de las condiciones favorables presentes en la geografía de esta región. Sin embargo, no se han llevado a cabo estudios relevantes de caracterización de los cultivos bajo malla, de cara a su optimización.

Los invernaderos de malla presentan ventajas frente a los invernaderos de plástico. Los requerimientos estructurales de estos invernaderos son menores que los de lámina plástica al ofrecer menor resistencia al viento y ser permeables al agua (Castilla, 2007). Es una estructura más sencilla y el coste de su construcción es menor que el de un invernadero plástico (Möller y col., 2003; Santos y col., 2006), además no requieren un gran consumo de energía para su enfriamiento (Desmarais y col., 1999). La aplicación de pesticidas químicos es menos frecuente en el invernadero de malla en comparación con los invernaderos de plástico con ventilación natural, ya que se ha demostrado que las mallas disminuyen la incidencia de insectos y plagas (Teitel y Shklyar, 1998; Möller y col., 2003). Además, la ventilación en el interior del invernadero de malla es mejor (Moller y Assouline, 2007). Por otra parte, los invernaderos de malla tienen un gran inconveniente relacionado con el sobrecalentamiento en su interior cuando la velocidad del viento es baja y la humedad relativa alta (Ross y Gill, 1994; Desmarais y col., 1999; Möller y col., 2003; Santos y col., 2006), debido principalmente a la reducción del flujo del aire ocasionado por la baja porosidad de la malla (Möller y col., 2004; Majdoubi y col., 2007).

El principal parámetro climático afectado por la malla es la radiación solar, que depende del material de cubierta (Pérez y col., 2006). Hay escasa información de las condiciones radiativas generadas bajo estructuras de malla que permita optimizar el diseño, en cuanto a la geometría de la cubierta y a los materiales utilizados. No existe suficiente información acerca del comportamiento de los numerosos tipos de mallas existentes en el mercado (Romacho y col., 2005). La transmisividad a la radiación solar de una malla, depende del tipo de radiación incidente (directa o difusa), de las propiedades de absorbancia y reflectancia de la malla, del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie del tejido y de la estructura y características del material (composición, porosidad, color, diámetro, forma del hilo, etc.) (Soni y col., 2005; Soriano y col., 2006; Sica y Picuno, 2008). La porosidad de la malla determina el factor de sombreo y la permeabilidad al aire. El empleo de mallas de colores provoca una diferenciación espectral en la radiación solar incidente produciendo cambios en la floración y ramificación de las plantas (Shahak, 1999, citado en Tanny y col., 2003). Es necesario, por tanto, la caracterización de la transmisividad en mallas, pues es un factor determinante del crecimiento y producción de los cultivos. Para el estudio de la radiación solar incidente sobre un cultivo y la estimación de la transmisividad de diversas estructuras de

protección, se han desarrollado modelos de simulación numérica como herramienta de investigación en agricultura gracias a la versatilidad de la técnica (Gary y col., 1998). Estos modelos permiten un manejo mas sencillo y eficaz del sistema y permiten la introducción de mejoras, facilitando la toma de decisiones (Soriano, 2002).

Una característica del sector productivo de cultivos intensivos bajo protección (invernaderos y túneles de cultivo) es su gran estabilidad frente a la variabilidad climática que, en el caso de cultivos al aire libre puede determinar importantes fluctuaciones en la producción final obtenida. Se han desarrollado diversas soluciones para adecuar el microclima de los invernaderos de cubierta plástica al crecimiento de los cultivos para intentar mantener unos niveles de calidad adecuados en los meses de verano. Aunque mediante técnicas pasivas (ventilación natural y/o enalado de la cubierta) se pueden disminuir las temperaturas y los déficits de presión de vapor, las modificaciones obtenidas no parecen suficientes para una óptima producción (Castilla, 2007). La ventilación forzada se ha introducido recientemente pero, junto al alto consumo de energía, tiene el inconveniente de que puede aumentar la incidencia de plagas, ya que estas son favorecidas por la entrada del aire a presión en el invernadero. La solución de dotar a los ventiladores de tupidas mallas hace que baje mucho su eficiencia. La técnica refrigerante de mas rápida respuesta es la nebulización, fundamentalmente la de alta presión (fog system) aunque precisa de agua de excelente calidad debido a la facilidad en la obturación de los emisores (Montero y col., 2003) y en grandes cantidades.

Hasta hace unos años la información publicada sobre el microclima bajo invernadero de malla y su efecto en los cultivos era escasa. En la última década se ha incrementado (Möller y col., 2003; Tanny y col., 2003; Santos y col., 2006; Tanny y col., 2006; Möller y Assouline, 2007; Al-Mulla y col., 2008; Kittas y col., 2009; Mutwiwa y Tantau, 2009, etc.), pero sigue siendo necesaria la investigación acerca de equipamientos para mejorar el microclima de estas estructuras, por su presencia cada vez mayor en las diferentes áreas del mundo. La instalación de sistemas de nebulización en invernaderos de malla puede resultar interesante en cultivos de verano, en condiciones de baja humedad relativa del aire, temperaturas diurnas elevadas y DPV elevados. Para mitigar estas condiciones, los sistemas de nebulización de baja presión son una buena opción ya que presentan la ventaja de poder emplear aguas de peor calidad y tuberías de plástico para la distribución del agua, lo que disminuye notablemente tanto los costes de instalación como de funcionamiento (Gázquez y col., 2010). Para accionar estos sistemas de nebulización, la mejor opción es un controlador automático en combinación con sensores de humedad y temperatura de buena calidad (Montero y col., 2003), estableciendo pulsos de nebulización en función de un valor determinado de DPV.

Otro factor a tener en cuenta es la implicación de estos sistemas de cultivo en la explotación del medio natural. Tanto en la práctica de la agricultura intensiva bajo plástico como en los cultivos y plantaciones al aire libre, se producen agresiones de mayor o menor intensidad al medio y sobre los recursos del mismo como consecuencia, principalmente, del uso y manejo de estructuras, equipamientos y técnicas de cultivo. Debido a la intensidad de las prácticas de cultivo, se producen alteraciones de equilibrio y desajustes en el medio e incluso se llegan a producir desastres ecológicos que afectan a las especies cultivadas, a la fauna y la flora, al medio (aire, agua y suelo), e inclusive a la salud humana. En el cultivo bajo invernadero tienen lugar procesos que forman parte del ciclo de vida del producto capaces de producir daños al entorno. Se requiere, por tanto, un conocimiento más profundo sobre los impactos ambientales de las actividades agrícolas habituales (Mourad y col., 2007) y valorar la calidad ambiental del producto agrícola. Es necesario evaluar los respectivos procesos productivos e impactos ambientales potenciales que éstos ocasionan y realizar un análisis objetivo mediante procesos como el análisis del ciclo de vida (ACV). De esta forma se pretende conseguir una selección y mejora de las estructuras, sus equipamientos y de las técnicas de cultivo más respetuosas con el entorno y los recursos naturales. Los primeros estudios de análisis de impacto ambiental por ACV en invernaderos de malla son muy recientes (Romero-Gómez y col., 2009a y 2009b).

Este trabajo de investigación pretende llevar a cabo una evaluación de las estructuras de malla desde varios puntos de vista:

Se determinan las condiciones microclimáticas generadas bajo la malla y con un sistema de nebulización de baja presión incorporado para mitigar las temperaturas extremas del periodo estival, estudiando su repercusión en el desarrollo del cultivo de judía verde de enrame, para optimizar la utilización de todos los insumos en un enfoque sostenible, mediante una protección y producción integradas.

Se lleva a cabo la evaluación agronómica y productiva del cultivo de judía, para cuantificar el interés de su empleo, estableciendo criterios racionales que contribuyan a facilitar la toma de decisiones.

Se realiza una evaluación ambiental de estos sistemas mediante el Análisis del Ciclo de Vida. La demanda social de una producción más respetuosa con el medio ambiente hace necesario el empleo de tecnologías que contribuyan a la preservación del mismo, bajo criterios sostenibles, y permitan la obtención de productos de alta calidad en condiciones de seguridad alimentaria.

Se documentan las características cualitativas de la radiación bajo varios tipos de malla. La utilización de coloraciones integradas en el paisaje permitiría la reducción de su impacto ambiental visual.

Hay escasa información de las condiciones radiactivas generadas bajo estas estructuras que permita optimizar el diseño, tanto en cuanto a la geometría de la cubierta como a los materiales utilizados. Los modelos de cálculo de transmisividad a radiación solar y las maquetas a escala para validarlos se contempla como una excelente opción para llevar a cabo este tipo de estudio.

El desarrollo de la tesis incluye dos fases diferenciadas:

**Fase I.** Evaluación microclimática, agronómica y ambiental del cultivo de judía verde bajo malla con y sin nebulización.

**Fase II.** Caracterización de mallas y modelización de estructuras para mallas.

Los capítulos desarrollados en esta tesis son los siguientes:

## **Capítulo 1**

*Caracterización microclimática de un invernadero de malla con y sin nebulización. Comparación con el exterior.*

Se determinan las condiciones microclimáticas generadas por un cultivo de judía verde en un invernadero de malla (con y sin nebulización) y al aire libre de dos ciclos de cultivo de primavera-verano. Para ello, se realizan medidas de radiación global, PAR, radiación directa, temperatura de aire, temperatura de suelo, temperatura de hoja y humedad relativa del aire.

## **Capítulo 2**

*Comparación agronómica y productiva de un cultivo de judía verde bajo malla con y sin nebulización en época primavera-estival.*

Para la evaluación agronómica se cuantifica, durante dos ciclos de cultivo de primavera-verano, la producción comercial y total en parcelas de control. Se hace un seguimiento continuo de parámetros de crecimiento y muestreos destructivos con determinación de parámetros bioproductivos. Además, se cuantifica el consumo de agua por el sistema de riego y sistema de nebulización empleados para la determinación de la Eficiencia en el Uso del Agua de los sistemas productivos estudiados.

### **Capítulo 3**

*Evaluación del impacto ambiental generado por el cultivo bajo malla con y sin nebulización mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Comparación con cultivo al aire libre.*

Se analizan las cargas ambientales asociadas al cultivo de judía verde, a lo largo de su ciclo de vida, desde las materias primas inicialmente empleadas hasta el final de los residuos generados. Se comparan tres sistemas de producción: invernadero de malla, invernadero de malla equipado con sistema de nebulización y aire libre, en dos ciclos de cultivo de primavera-verano.

### **Capítulo 4**

*Caracterización transmisiva a radiación solar de materiales de cubierta y cerramiento para invernaderos de malla.*

Se determinan las curvas características de transmisividad a radiación solar global y PAR, el cociente entre la radiación difusa bajo malla (DIFi) y la radiación difusa exterior (DIFo) y los coeficientes de enriquecimiento en radiación difusa, en condiciones reales en campo de nueve mallas de diferente densidad, color, calibre, peso y porosidad, empleando un bastidor diseñado para tal efecto. También se compara el comportamiento de los diferentes tipos de mallas frente a los distintos tipos de radiación (global, difusa y PAR).

### **Capítulo 5**

*Validación del modelo TRADESMA para el cálculo de transmisividad a radiación solar directa en estructuras de mallas.*

Se lleva a cabo la adaptación de un modelo para el cálculo de la transmisividad a radiación solar de invernaderos mediterráneos (TRADINMED) al cálculo de la transmisividad a la radiación solar en estructuras de mallas (TRADESMA). Este capítulo incluye la validación del modelo TRADESMA mediante maquetas a escala y la comparación de la transmisividad a radiación global de las diferentes pendientes de cubierta y orientaciones estudiadas en dichas maquetas.

# Bibliografía

Al-Mulla, Y.A., Al-Balushi, M., Al-Rawahy, M., Al-Raisy, F., Al-Makhmary, S. 2008. Screenhouse microclimate effects on cucumber production planted in soilless culture (open system). *Acta Horticulturae* 801: 637-644.

Castilla, N. 2007. *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Ediciones Mundi Prensa. 462 pp.

Desmarais, G. and Raghavan, G.S.V. 1997. Thermal characteristics of screenhouse configurations in a West-African tropical climate. *Acta Horticulturae* 443: 39-46.

Desmarais, G., Ratti, C., Raghavan, G.S.V. 1999. Heat transfer modeling of screenhouses. *Solar Energy* 65(5): 271-284.

Gary, C. Tchamitchian, M. Bertin, N. Charasse, L. Rebillard, A. Cardi, J.P. 1998. SIMULSERRE: Un software educacional simulando el sistema invernadero-cultivo. *Acta Horticulturae* 456: 451-455.

Gázquez, J.C., López, J.C., Pérez-Parra, J., Baeza, E. 2010. Refrigeración por evaporación de agua. En: *Manejo del clima en el invernadero mediterráneo*. Ed: Sánchez-Guerrero, M.C., Alonso, F.J., Lorenzo, P., Medrano, E. 57-79.

Giordano, I., Pentagelo, A., Graziani, G., Fogliano, V. 2003. Effects of plastic screens on virus infection yield and qualitative characteristics of small tomatoes. *Acta Horticulturae* 614: 735-740.

Kittas, C., Rigakis, N., Katsoulas, N., Bartzanas, T. 2009. Influence of shading screens on microclimate, growth and productivity of tomato. *Acta Horticulturae* 807:97-102.

Majdoubi, H., Boulard, T., Hanafi, A., Bekkaoui, A., Fatnassi, H., Demrati, H., Nya, M., Bouirden, L. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Transactions of the ASAE* 50(2): 641-650.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S. 2003. Micrometeorological Characterisation in a Screenhouse. *Acta Horticulturae* 614:445-451.

Möller, M., Tanny, J., Li, Y., Cohen, S. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 35-51.

Möller, M. and Assouline, S. 2007. Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science* 25: 171-181.

Montero, JI., Antón, A., Muñoz, P. 2003. Nebulización: Efectos sobre el microclima, producción eficiencia en el uso del agua. *Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos*. Ed. Fernández, M. Lorenzo, P. Cuadrado, I. *Curso Superior de Especialización Volumen 7*: 231-243.

Mourad A.L., Coltro L., Oliveira PAPLV., Kletecke, R.M., Baddini JPAO. 2007. A simple methodology for Elaborating the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (6) 408-413.

Mutwiwa., U.N., Tantau, H.J. 2009. Insect screens for integrated plant protection in greenhouses. *Acta Horticulturae* 807: 85-90.

Pérez, M., Plaza, B.M., Jiménez, S., Lao, M.T., Barbero, J., Bosch, J.L. 2006. The radiation spectrum through ornamental net houses and impact on the climate generated. *Acta Horticulturae* 719: 631-636.

Romacho, I., Hita, O., Soriano, T., Morales, M.I., Suárez-Rey, E.M., Peláez, M., Hernández, H., Escobar, I., Castilla, N. 2005. Invernaderos de malla para cultivos estivales en comarcas no litorales: caracterización microclimática evaluación productiva del cultivo de tomate tipo cereza. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5, Volumen 1: 378-383.

Romero-Gámez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N. 2009a. Impactos ambientales del cultivo de judía verde. *Horticultura Internacional* 69: 12-19.

Romero-Gámez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N. 2009b. Environmental impact of greenbean cultivation: Comparison of screen greenhouses vs. open field. *Journal of Food, Agriculture & Environment* Volumen 7 (3&4): 754-760.

Ross, D.S. and Gill, S.A. 1994. Insect screening for greenhouses. University of Maryland. *Agricultural Engineering Information Facts* 186: 1-21.

Rylski, I. and Spigelman, M. 1986. Effect of shading on plant development, yield and fruit quality of sweet pepper grown under conditions of high temperature and radiation. *Scientia Horticulturae* 29:31-35.

Sajjapongse, A. and Roan, Y.C. 1983. Effect of Shading and Leaf-tying on Summer Chinese Cabbage. *Horticultural Science* Vol.18(4): 464-465.

Santos, B., Rios, D., Nazco, R. 2006. Climatic conditions in tomato screenhouse in Tenerife (Canary Islands). *Acta Horticulturae* 719: 215-221.

Sica, C. and Picuno, P. 2008. Spectro-radiometrical characterization of plastics nets for protected cultivation. *Acta Horticulturae* 801: 245-252.

Soni, P., Salokhe, V. M., Tantau, H. J. 2005. Effect of screen mesh size on vertical temperature distribution in naturally ventilated tropical greenhouses. *Biosystems Engineering* 92 (4): 469-482.

Soriano, T. 2002. Validación de un modelo de cálculo de transmisividad a radiación solar directa en invernadero mediante maquetas a escala y determinación del prototipo óptimo para la costa mediterránea. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. 274 pp.

Soriano, T., Morales, M.I., Hita, O., Romacho, I. 2006. Cultivos estivales bajo mallas plásticas. *Horticultura* 192, 14-18.

Tanny, J., Cohen, S., Teitel, M. 2003. Screenhouse microclimate and ventilation: a experimental study. *Biosystems Engineering* 84 (3): 331-341.

Tanny, J., Haijun, I., Cohen, S. 2006. Airflow characteristics, energy balance and eddy covariance measurements in a banana screenhouse. *Agriculture and Forest Meteorology* 139: 105-118.

Tanny, J. 2010. Screen constructions for environmentally sound crop production. 28th International Horticultural Congress (en prensa).

Teitel, M. and Shklyar, A. 1998. Pressure drop across insect-proof screens. *Transactions of the ASAE* 41(6): 1829-1834.

# FASE I

EVALUACIÓN MICROCLIMÁTICA, AGRONÓMICA  
Y AMBIENTAL DEL CULTIVO DE JUDÍA VERDE BAJO  
MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN.

---



Resultados relacionados con los presentados en la Fase I han sido publicados en las siguientes revistas:

AUTORES: M. Romero-Gómez, E.M. Suárez-Rey, N. Castilla, T. Soriano, J. Casadesús, A. Antón y J.I. Montero

TÍTULO: Efectos de la nebulización sobre el microclima y producción del cultivo de judía verde bajo invernaderos de malla

AÑO: 2008

REVISTA: Actas de Horticultura, Núm. 50, Pag. 76-82

ISBN: 978-84-612-5118-6

AUTORES: M. Romero-Gómez, E.M. Suárez-Rey, N. Castilla, T. Soriano, J. Casadesús, A. Antón y J.I. Montero

TÍTULO: Refrigeración activa en invernaderos de malla para producción hortícola protegida en el periodo estival

AÑO: 2008

REVISTA: Horticultura, Núm. 207, Pag. 10-20

ISSN: 1132-2950

AUTORES: Romero-Gómez, M.; Casadesús, J.; Soriano, T.; Suárez-Rey, E.M.; Castilla, N.; Antón, A.; Muñoz, P.; Montero, J.I.

TÍTULO: Sistemas de nebulización de baja presión en cultivos estivales bajo mallas plásticas

AÑO: 2008

REVISTA: Agrícola Vergel, Núm. 319, Pag. 340-344

ISSN: 0211-2728

AUTORES: Romero-Gómez, M.; Soriano, T.; Casadesús, J.; Suárez-Rey, E.M.; Antón, A.; Montero, J.I.; Castilla, N.

TÍTULO: Estudio de estrategias de refrigeración por nebulización de baja presión en el microclima de un invernadero de malla

AÑO: 2009

REVISTA: Actas de Horticultura, Num. 54. Pag. 499-504

ISBN: 978-84-8125-326-9.

AUTORES: M. Romero-Gómez, A. Antón, T. Soriano, E.M. Suárez-Rey, N. Castilla,.

TÍTULO: Impactos ambientales del cultivo de judía verde

AÑO: 2009

REVISTA: Horticultura Internacional, Núm. 69, Pag. 12-19

ISSN: 1132-2950

AUTORES: Mercedes Romero-Gómez, Assumpció Antón, Teresa Soriano, Elisa M. Suárez-Rey, Nicolás Castilla

TÍTULO: Environmental impact of greenbean cultivation: Comparison of screen Greenhouses vs. open field

AÑO: 2009

REVISTA: Journal of Food, Agriculture & Environment Vol. 7 (3 & 4), Pag. 754-760

ISSN: 1459-0255 / Online ISSN: 1459-0263

AUTORES: M. Romero-Gómez, E. M. Suárez-Rey, A. Antón, N. Castilla and T. Soriano

TÍTULO: Analysis of the life cycle of a greenbean crop grown in the open air and in a screen greenhouse with and without misting

AÑO: 2010

REVISTA: Journal of Cleaner production (enviado)

**CAPÍTULO 1.**  
CARACTERIZACIÓN MICROCLIMÁTICA  
DE UN INVERNADERO DE  
MALLA CON Y SIN NEBULIZACIÓN.  
COMPARACIÓN CON EL EXTERIOR

---





# 1. Introducción

El cultivo bajo invernadero permite obtener producciones de primor y calidad con altos rendimientos en las épocas del año más desfavorables, consiguiendo mejores precios. Este incremento del valor de los productos posibilita que el agricultor pueda invertir tecnológicamente en su explotación mejorando, entre otros, los sistemas de gestión del clima, reflejándose posteriormente en incrementos de rendimientos y calidad del producto final.

El sistema productivo bajo invernadero plástico mediterráneo se basa en la utilización de un mínimo de energía, lo que genera para la mayoría de las especies cultivadas unas condiciones microclimáticas subóptimas (Castilla, 1994). Se trata de obtener una producción aceptable fuera de estación al menor coste posible, aprovechando las bondades del clima. Sin embargo, para poder cultivar con éxito durante los meses de verano, se deberían proporcionar unas condiciones de humedad y temperatura adecuadas, pues procesos fundamentales para la producción, como la floración y el cuajado de los frutos se ven seriamente afectados por las temperaturas elevadas (Peet y col., 1997).

Hasta ahora, la falta de adaptación de las estructuras, junto con la ausencia de equipos de control climático en la mayoría de nuestros invernaderos de plástico, provocaba valores extremos indeseables tanto de temperatura como de humedad en épocas de alta radiación.

Por tanto, reducir la temperatura para prolongar los ciclos de cultivo bajo plástico (Arbel y col., 2000) es uno de los mayores problemas para la horticultura protegida en climas cálidos. En invernaderos plásticos litorales existe ya un alto grado de automatización para productos de alto

valor comercial (cultivo ornamental, flor cortada), pero conllevan un importante coste medioambiental por su elevado consumo energético, especialmente, en sistemas de ventilación forzada (Soriano y col., 2006a). Además, para cultivos hortícolas en invernaderos plásticos, estos equipamientos no consiguen valores aceptables de producción al final de primavera, debido a las condiciones tan extremas de radiación y falta de ventilación por las mallas antiinsectos instaladas en las ventanas, y por la presión de plagas y enfermedades, por lo que no se rentabiliza la inversión necesaria (Hita y col., 2007).

En comarcas del interior, especialmente en las de cierta altitud, el rigor térmico invernal reduce la pervivencia de plagas, por lo que hasta ahora no era preciso el cultivo en recintos aislados del exterior mediante mallas muy tupidas que impidieran el acceso de insectos, como ocurre en los invernaderos del litoral. La utilización de una estructura cubierta de malla tejida, que disminuya la radiación incidente, reduzca la incidencia del viento y aumente la humedad relativa del aire, posibilita ciclos de cultivo desde primavera hasta otoño (en el periodo libre de heladas) en estas comarcas no litorales (Soriano y col., 2006b). Estas estructuras presentan una menor carga eólica y pluvial que los invernaderos plásticos, por lo que tienen menores requerimientos, reduciendo así el coste de inversión. En cualquier caso, la realización de toda inversión deberá ser precedida de un estudio económico que cuantifique el beneficio en producción y calidad derivado de los distintos niveles de tecnificación posibles.

El “nivel de saturación de radiación” (a partir del cual los incrementos de radiación no conllevan aumentos paralelos de fotosíntesis) se produce durante los meses de alta radiación y a las horas centrales del día. Si bien sobrepasar este nivel no es en principio perjudicial para los cultivos, desde el punto de vista radiativo, sí puede afectar negativamente a las temperaturas de la planta, del aire, del suelo, del agua y de los objetos que absorben las radiaciones (Castilla, 2007). La primera alteración que genera el invernadero de malla sobre los parámetros microclimáticos es, precisamente, una reducción de la radiación solar incidente sobre el cultivo. Se han realizado medidas prospectivas en las comarcas de interior del sureste español, cuantificando reducciones de entre el 25% y el 35% de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), en torno al mediodía solar respecto al exterior, en las mallas más usuales y de hasta el 50% en mallas con características especiales (Morales y col., 2006). Uno de los factores más importantes para el crecimiento de las plantas es la cantidad de luz interceptada por el cultivo, que depende, además de la radiación incidente en el invernadero y del porcentaje de intercepción del cultivo, el cual está directamente relacionado con el área foliar (Janssen y col., 2007).

Los invernaderos de malla surgieron como una opción prometedora del cultivo primavera-estival, pero presentan ciertos problemas, siendo los más usuales: Exceso de temperatura y baja humedad ambiental en verano (por lo que el Déficit de Presión de Vapor (DPV), se mantiene elevado), exceso de sombreado al final de ciclo (en ciclos de cultivo que se alargan hasta principios de otoño), DPVs extremos a mediodía (Romero-Gómez y col., 2009 midieron valores de hasta 6 kPa en judía y Romacho y col., 2005 un valor similar para cultivos de tomate) y, en general, dificultad para controlar las condiciones ambientales (Romero-Gómez y col., 2008b). Por ello, aunque se ha analizado el microclima de los invernaderos de malla (Desmarais y col., 1999; Möller y col., 2003; Tanny y col., 2003; Tanny y col., 2006; Al-Mulla y col., 2008; Kittas y col., 2009; Mutwiwa y Tantau, 2009, entre otros), el estudio de este tipo de estructuras protegidas requiere una mayor evaluación de los parámetros microclimáticos así como su influencia en los cultivos.

El exceso de temperatura y las bajas humedades provocan en la planta periodos de estrés que afectan a su metabolismo, con pérdidas en el cuajado de frutos y disminución en el rendimiento y la calidad de las producciones, como se ha documentado por ejemplo, en pimiento (López-Marín y col., 2009a), tomate (Ho, 1996; Adams y col., 2001; Muholland y col., 2003; Saltveit, 2005; Fleisher y col., 2006) o judía (Maroto, 2002; Romero-Gómez y col., 2009). Desde el punto de vista fisiológico resulta más interesante el control del Déficit de Presión de Vapor (DPV), ya que integra temperatura y humedad. Este parámetro indica el movimiento de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera y, como tal, influye en gran medida en el estrés hídrico de la planta. Los cambios de estado del agua contribuyen al transporte de grandes cantidades de energía, afectando notablemente a las temperaturas del cultivo y su entorno (Castilla, 2007).

El DPV, también llamado déficit de saturación, expresa el contenido en vapor de agua del aire como la cantidad de agua que el aire, a una cierta temperatura, puede absorber antes de alcanzar la saturación. La atmósfera está normalmente subsaturada, siendo la presión de vapor actual ( $e_a$ ) inferior al valor de saturación ( $e_s$ ) a temperatura ambiente (Allen y col., 1994):

$$\text{DPV} = e_s - e_a$$

donde:

$e_s$ : Presión de vapor a saturación (kPa)

$e_a$ : Presión de vapor actual (kPa)

Ecuación 1

$$e_a = e^o(T) = 0,611 \exp (17,27T / (T + 237,3))$$

Ecuación 2

siendo :

 $e^o(T)$ : Presión de vapor a saturación en función de la temperatura (kPa)

T: Temperatura del aire (°C)

$$e_d = e_a (HR/100)$$

Ecuación 3

donde:

HR: humedad relativa del aire (%)

Lorenzo y col. (2003) y Caparrós y col. (2005) determinan que para cultivos desarrollados, el descenso del DPV asociado al sombreado (sombreado exterior móvil en invernadero de plástico) está dentro del orden de 1kPa. Lorenzo y col. (2004) comparando el sombreado móvil con la nebulización, obtuvieron valores medios de DPV similares. Sin embargo, Meca y col. (2007), mostraron que la nebulización de baja presión era el sistema de refrigeración más eficiente respecto al blanqueo y a la pantalla móvil para controlar las altas temperaturas ambientales y para mantener niveles de DPV bajos en invernaderos de plástico.

Möller y col. (2004), desarrollaron un modelo para predecir la evapotranspiración en estas estructuras y demostraron que la reducción de la radiación y velocidad del aire bajo la malla y la modificación del DPV, son los principales factores que influyen en la transpiración del cultivo.

Möller y Assouline (2007), compararon las condiciones microclimáticas y el consumo de agua de un cultivo de pimiento bajo un invernadero cubierto con una malla negra y al aire libre, concluyendo que la malla redujo la radiación global en un 40%, la velocidad del viento en un 50% y la evapotranspiración del cultivo un 38% respecto al aire libre. Sin embargo, la malla no modificó de forma significativa las temperaturas y el DPV máximos diarios. Los invernaderos de malla presentan un gran inconveniente como es el recalentamiento en el interior del invernadero cuando la velocidad del viento es baja y la humedad relativa alta (Desmarais y col., 1999; Möller y col., 2003;

Santos y col., 2006). Esto se debe principalmente a una reducción en el flujo de aire en el invernadero debido al pequeño tamaño de los huecos de la malla (Möller y col., 2004; Majdoubi y col., 2007). Möller y col. (2004) concluyen que la estructura del invernadero, el tamaño de hueco de la malla y el color, juegan un papel importante en las condiciones térmicas.

Se han caracterizado las condiciones climáticas registradas dentro y fuera de invernaderos de malla para la producción de tomate en el litoral (Tenerife). En este caso, Santos y col. (2006), no observaron grandes diferencias de temperatura y DPV entre el interior y exterior de la malla. Incluso, las temperaturas medias diarias en el interior fueron ligeramente superiores a las del exterior. En cambio, los valores de radiación se redujeron un 30% bajo mallas limpias y un 50% en mallas sucias.

También se han observado variaciones en el microclima generado bajo la malla en función de la altura de la estructura. Un ensayo con umbráculos de 2 m y 4 m de altura mostró como, aunque la radiación neta transmitida fue muy similar, la temperatura y el DPV del aire cerca de las plantas y las temperaturas de hoja eran mayores para el invernadero más bajo, con diferencias de temperatura ambiental diarias de 1,5 °C y de temperatura de hoja a mediodía de 2 °C. La humedad del umbráculo más alto fue más próxima a la exterior, lo que indica una mayor tasa de ventilación (Tanny y col., 2008).

La vaporización del agua aportada mediante nebulización absorbe calor del aire del invernadero y por tanto, baja también la temperatura ambiente, con lo que se puede reducir el DPV. Puede resultar interesante la instalación de sistemas de nebulización si se pretende cultivar en verano en condiciones de baja humedad relativa del aire y temperaturas diurnas elevadas. En algunos casos, este sistema ha permitido mantener el DPV por debajo de los valores críticos (Nisen y col., 1988; Castilla, 2007).

Los sistemas de nebulización de baja presión (4 atm) no suponen grandes inversiones económicas, pero en nuestras condiciones hemos observado que son sensibles a la calidad del agua (principalmente por obturación de boquillas debido a la alta concentración de carbonatos), y parece que no consiguen bajar la temperatura foliar a no ser que los valores de tasa de ventilación natural sean elevados, lo cual no siempre es posible en días de verano (Baille, 2001). Estos sistemas de baja presión, además pueden presentar el inconveniente de mojar las plantas, pues el tamaño de la gota es próximo a 100 micras. Sin embargo, se ha demostrado en invernadero de cubierta de plástico que, si las boquillas están gobernadas por un controlador eficaz que actúe en las horas centrales del día tratando de mantener una humedad relativa no mayor del 70%, y actuando en ciclos cortos que

permitan el secado de las hojas, los problemas derivados del exceso de humedad se podrían minimizar (Montero y col., 2003). Hirai y col. (2008) demostraron la eficiencia de un tratamiento de refrigeración por evaporación de agua bajo malla durante los meses de verano para bajar la temperatura del aire y de la hoja de un cultivo de té verde. La refrigeración se realizaba de forma intermitente durante el día consiguiendo bajar tanto la temperatura del aire como la de hoja hasta 3°C.

En trabajos anteriores se probó un controlador por DPV para nebulización bajo malla durante los ciclos estivales 2006 y 2007 y se dedujo la necesidad de establecer pulsos de control inferiores a 2 minutos para mejorar el control (Romero-Gómez y col., 2008a) y la necesidad de reducir el funcionamiento únicamente a las horas centrales del día para disminuir el consumo de agua (Romero-Gómez y col., 2008b).

## 2. Objetivo

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de un sistema de nebulización de baja presión sobre el microclima de un invernadero de malla, además de cuantificar el consumo de agua de dicho sistema. Se ha comparado una estructura cubierta de malla y provista de nebulización de baja presión (MN) con una estructura de malla sin nebulización (M) y con cultivo al aire libre (AL), para producción de judía verde de enrame. El estudio se llevó a cabo en primavera-verano de los ciclos de cultivo 2008 y 2009.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Localización

El estudio se desarrolló en el Centro IFAPA Camino de Purchil, en cuyas instalaciones se construyó el invernadero de malla y se diseñó la estructura de las parcelas al aire libre. Estas instalaciones estaban ubicadas en la Vega de Granada, dentro del término municipal de Granada (Latitud: 37º 10' 21"N; Longitud: 3º 38' 10"O; Altitud: 600 m). Según la clasificación de Papadakis (1960) la caracterización agroclimática de la Vega de Granada queda definida por un invierno avena cálido, un verano arroz y un régimen de humedad Mediterráneo seco.

### 3.2. Descripción de las parcelas de ensayo

#### 3.2.1. Invernadero de malla

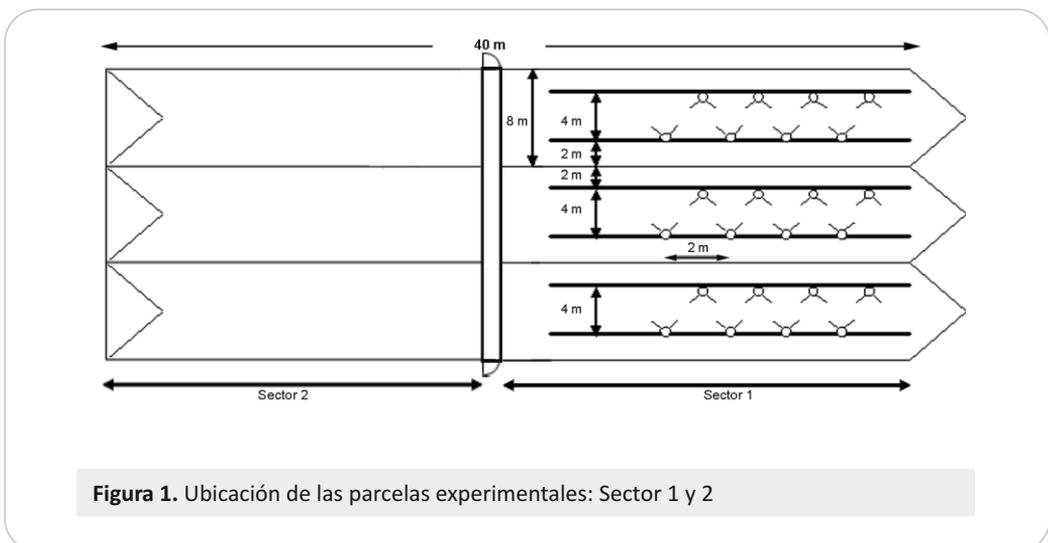
Se utilizó un invernadero con cubierta de malla de 960 m<sup>2</sup> de superficie, de estructura similar a los invernaderos de comarcas del interior granadino. Se trata de una estructura metálica de acero galvanizado, trimodular, con módulos de 8 m de ancho y 40 m de longitud. La distancia entre cumbreras era de 8 m y entre postes de 5 m, en sentido longitudinal. Las dimensiones totales eran de 24 x 40 m<sup>2</sup>, con la orientación del eje principal en dirección norte-sur. La altura de la cumbrera era de 4 m y la del canalón era de 3,5 m. La estructura vertical interna estaba formada por postes metálicos redondos sobre los que se apoyaba el material de cubierta. El tejido de cubierta del techo y la cubierta frontal y lateral quedaban sujetos por una red de alambres de 3 mm de diámetro. En el interior del invernadero, entre los postes, había además alambres tensores tanto simples como trenzados.

La cubierta se hizo con malla mono-filamento de polietileno natural blanca-negra de  $9 \times 6$  hilos  $\cdot \text{cm}^{-2}$  (58% de porosidad). Las bandas de la estructura del invernadero se realizaron con malla negra de  $16 \times 10$  hilos  $\cdot \text{cm}^{-2}$  en todo el perímetro y rafia plastificada impermeable al aire. El suelo fue acolchado con rafia negra de polietileno para evitar la nascencia de malas hierbas y la pérdida de humedad del suelo. El riego en todos los tratamientos fue a la demanda por goteo automatizado, con emisores en línea de  $3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  de caudal y densidad  $4,4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ .

El invernadero se dividió en dos sectores (sector 1 y 2). En el sector 1 se incorporó un sistema de nebulización de baja presión para caracterizar su efecto refrigerante en el microclima y en el desarrollo del cultivo. Este sector estaba separado del sector 2, que carecía del sistema de nebulización, por una cortina plástica colocada a lo largo del pasillo central del invernadero (figura 1).

Se instalaron dos líneas portaboquillas en cada módulo del invernadero, separadas 4 m entre sí y a 2 metros del canalón. La altura de instalación fue de 3,5 m (altura de canalón).

La presión de trabajo de la nebulización fue de 450 kPa. Las boquillas eran de  $7 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  y estaban separadas 2 m entre sí al tresbolillo.



Para controlar la nebulización se utilizó un equipo diseñado en colaboración con el IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Centro de Cabrils), (Controlador IRTA-IFAPA®, Modelo de Utilidad nº U200700970) (Casadesús y col., 2008) que controlaba el funcionamiento de las boquillas en función de un valor preestablecido de DPV y que actuaba en ciclos cortos para 27

minimizar posibles problemas derivados del exceso de humedad en hojas.

Este controlador mide y regula el DPV, de modo que la nebulización se produce en respuesta a la capacidad de evaporación del agua en las condiciones ambientales en que se encuentra el invernadero en cada momento. Para ello, el equipo efectúa pulsos de nebulización a una frecuencia preestablecida con una duración del pulso ajustada por el controlador. Este ajuste se realiza en respuesta a la diferencia entre el DPV medido y el DPV programado en el periodo inmediatamente anterior y en los dos ciclos anteriores. La elevada frecuencia de los pulsos dosifica el aporte de agua evitando que se produzcan ciclos de valores extremos de DPV entre el momento en que se dispara la nebulización y el momento en que ésta hace su efecto (Casadesús y col., 2008).

Para poder manejar el control por DPV de manera distinta durante las horas diurnas y durante las nocturnas, este controlador permite fijar consignas de DPV distintas, o activar la regulación solamente en uno de estos dos intervalos horarios o en subintervalos horarios dentro de ellos. El mismo controlador registra cada minuto los valores medidos de temperatura del aire y humedad relativa, mediante una sonda de humedad y temperatura (HMP45YC, Vaisala, con valores en °C y %) colgada a la altura del cultivo, el DPV calculado a partir de éstos y la duración del pulso de nebulización efectuada. Esta se calcula según la siguiente ecuación (Casadesús y col., 2008):

$$H = \frac{PID_p (s + PID_D \cdot ds + PID_I \cdot I_s)}{s + PID_C}$$

Ecuación 4

donde  $H$  es la intensidad de la respuesta (entre 0-100),  $s$  es la diferencia entre el DPV promedio medido del ciclo y el valor consignado,  $ds$  es el incremento de  $s$  respecto al ciclo anterior,  $I_s$  es la media de  $s$  en los 3 ciclos anteriores (incluido éste), y  $PID_p$ ,  $PID_D$ ,  $PID_I$  y  $PID_C$  son parámetros de ajuste de la respuesta. Una vez calculada  $H$ , se convierte a segundos de duración de los pulsos de nebulización mediante:

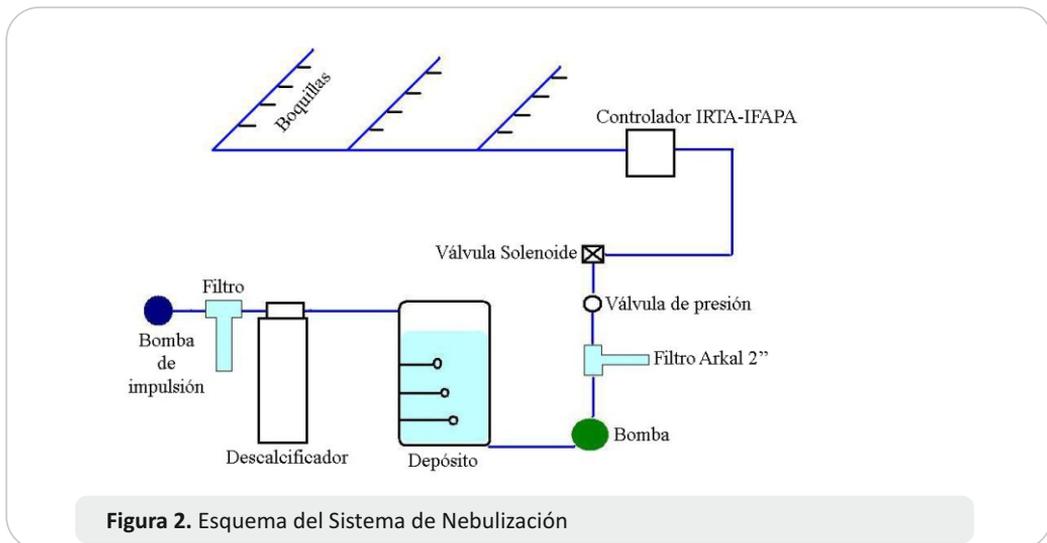
$$f o g = \frac{H \cdot t_{ciclo}}{100}$$

Ecuación 5

donde  $f o g$  es la duración real de los pulsos de nebulización (en segundos) y  $t_{ciclo}$  es la frecuencia preestablecida de pulsos de nebulización (en segundos).

En este ensayo, la frecuencia establecida de los pulsos se fijó en un 90 segundos y el DPV de consigna para la nebulización fue de 2,5 kPa con un intervalo de funcionamiento durante el día de 6 horas alrededor del mediodía solar (entre las 10:00h y las 16:00h solares). El resto del tiempo el controlador se mantuvo desactivado, intentando reducir al mínimo el consumo de agua. La cuantificación de este consumo se realizó en función de las horas de funcionamiento real dentro del intervalo y del caudal de las boquillas.

El cabezal para nebulización (figura 3) incluía una bomba para llenado del depósito, un filtro de malla, un descalcificador, un depósito con dosificador con tres sensores de nivel para detectar la bajada del agua y activar el motor de llenado, una bomba de impulsión de agua a las líneas portaboquillas, un filtro Arkal de 2", una válvula de presión, una válvula solenoide y otros elementos menores.



La automatización del sistema de nebulización permitía que el controlador activara el relé del cuadro para abrir y cerrar la válvula, gobernando el arranque y parada de la bomba de nebulización.

### 3.2.2. Parcela al aire libre

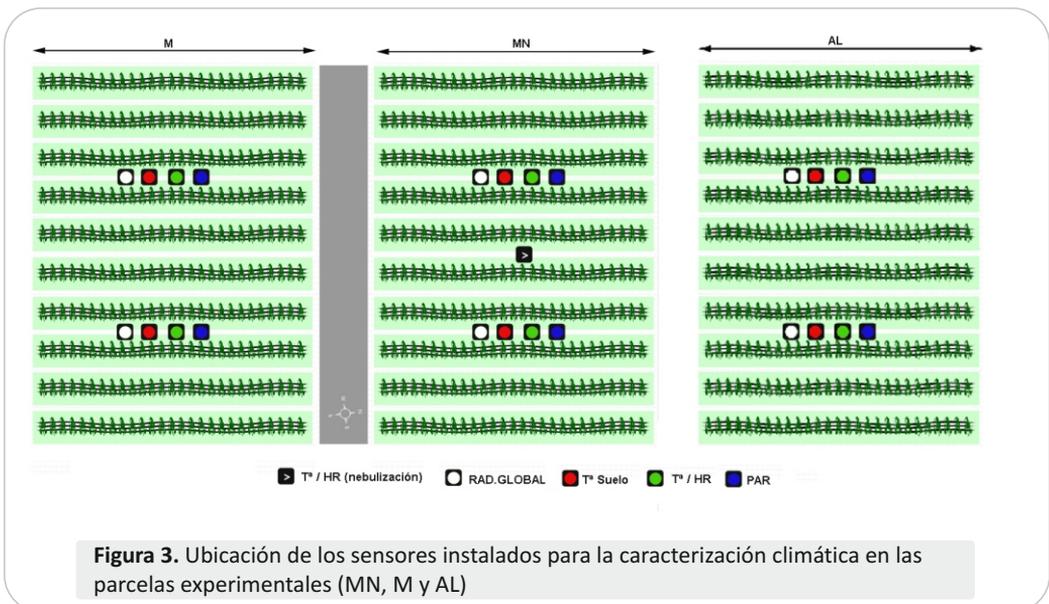
El estudio al aire libre tuvo lugar en una parcela de 494 m<sup>2</sup>. Se instaló una estructura de entutorado vertical para conseguir una disposición del cultivo idéntica a la del invernadero, con postes metálicos redondos sobre los cuales se fijó la red de alambres necesarios. Esto permitió igualar parámetros entre tratamientos, como la disposición del cultivo para interceptación de radiación y sombreo entre líneas y la circulación de aire entre ellas. El suelo fue acolchado también con rafia negra de polietileno. El riego fue por goteo automatizado y se diseñó y manejó con los mismos criterios que en los sistemas de cultivo bajo malla.

### 3.3. Estudio microclimático

Para la caracterización climática se instalaron sondas de temperatura y humedad del aire (HMP45C, Vaisala, con valores en °C y %), sensores de temperatura del suelo (107, Campbell Sci., con valores en °C), a 10 cm de profundidad y sensores de radiación global (SKS1110, Sky Instruments, con valores en  $W \cdot m^{-2}$ ) y de radiación fotosintéticamente activa (SKP215/S, Sky Instruments, con valores en  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Se instalaron dos sensores de cada tipo por sistema de cultivo (figura 3). Los sensores se conectaron a un datalogger CR10X de Campbell Sci., programado para registrar medidas simultáneas cada cinco minutos y registrar el promedio de 30 minutos. Los datos empleados en el estudio son el promedio de los valores obtenidos por los dos sensores utilizados para cada medida. Se realizó una calibración previa de todos los sensores empleados, a lo largo de un día soleado.

Los datos promediados cada media hora fueron también procesados para obtener:

- Temperaturas medias, máximas y mínimas diarias y quincenales (en °C) de aire y de suelo.
- DPV medio, máximo y mínimo diario y quincenal (en kPa)
- Integral diaria y acumulada a lo largo del ciclo de radiación global (en  $MJ \cdot m^{-2}$ )



Además, se realizaron medidas semanales de temperatura de hoja (a media altura de la planta) en el haz y en el envés en tres momentos del día: a primera hora de la mañana (6:00 hora solar), a media mañana (9:00 hora solar) y a mediodía (12:00 hora solar). Se empleó un termómetro

de infrarrojos (PCE-889, PCE GROUP) dotado de un visor láser para indicar el punto de medida. Por otro lado, se realizaron muestreos semanales del contenido relativo de clorofila en hojas de judía con un medidor SPAD 502 (Soil Plant Analysis Development, Minolta). Las medidas se realizaban semanalmente en las hojas de la parte central de la planta sobre las 08:00 horas solares. Para cada año, en el estudio de temperatura y clorofila de hoja, se utilizó un diseño estadístico multifactorial con factores anidados y tres repeticiones, siguiendo la metodología descrita por Júdez (1991). El factor principal es el sistema de cultivo: bajo malla (M), bajo malla con nebulización (MN) y testigo aire libre (AL) y el factor anidado es la orientación: este (E) u oeste (O), dentro de cada sistema. Se establecieron por tanto, 6 tratamientos: ME, MNE, ALE, MO, MNO y ALO, con 3 repeticiones en cada uno. El factor año se ha tomado como una fuente de variación cruzada con los sistemas de cultivo.

Para los valores de DPV y temperatura del aire máximos, medios y mínimos se realizó el análisis estadístico para cada quincena, tomando los días como repeticiones. El test discriminador de medias utilizado fue el de la mínima diferencia significativa (Gómez y Gómez, 1984).

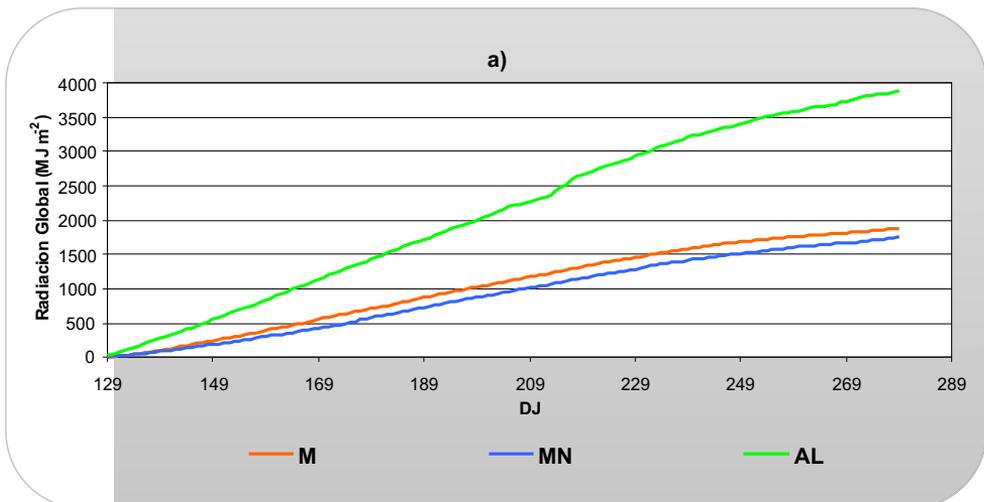
### 3.4. Calendario

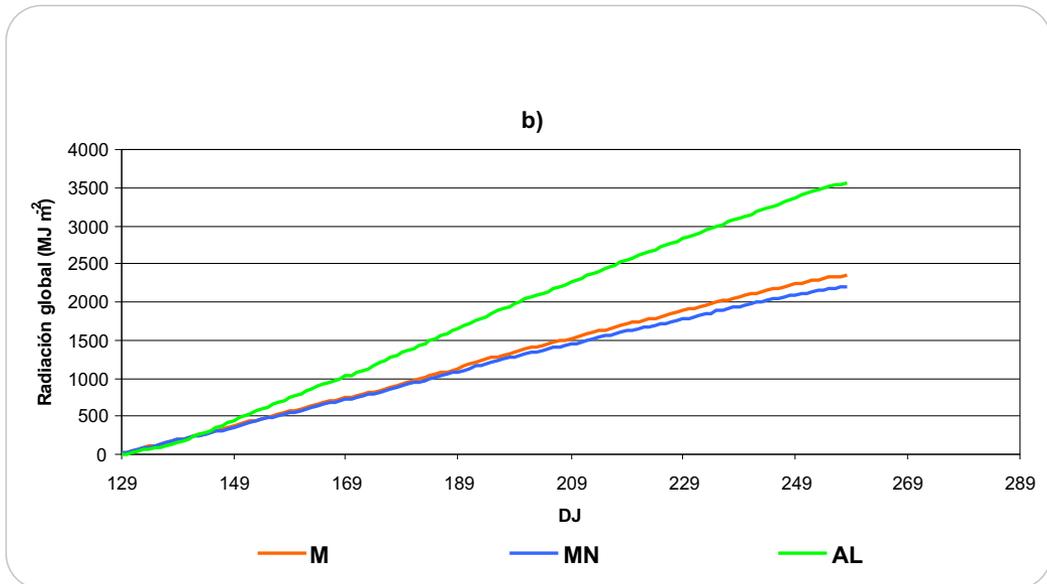
Los datos de radiación global y PAR, temperatura de aire, hoja y suelo, así como DPV y clorofila, se registraron para 7 quincenas en el sistema de cultivo AL y 10 quincenas para los sistema de cultivo bajo malla, en 2008 (ya que el ciclo de cultivo en AL concluyó 55 días antes que en M y MN). En 2009, todos los datos se registraron durante 9 quincenas para todos los tratamientos.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Radiación

El microclima interior generado por la malla está caracterizado por una reducción importante de los valores medios diarios de radiación global (48,6% y 30,1% respecto a AL para el ciclo 2008 y 2009 respectivamente). La reducción de la integral de radiación global medida en el sistema de cultivo M fue de  $1997,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  (2008) y de  $1209,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  (2009), respecto a la integral medida en AL (figura 4). Las gotas dispersas en el aire por la nebulización redujeron aún más este valor alcanzando diferencias de  $132,9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  en 2008 y  $155,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  en 2009 en el sistema MN respecto a M. La reducción media diaria de radiación global de MN fue de 3,4% y 6,5% respecto a M para el ciclo 2008 y 2009, respectivamente.

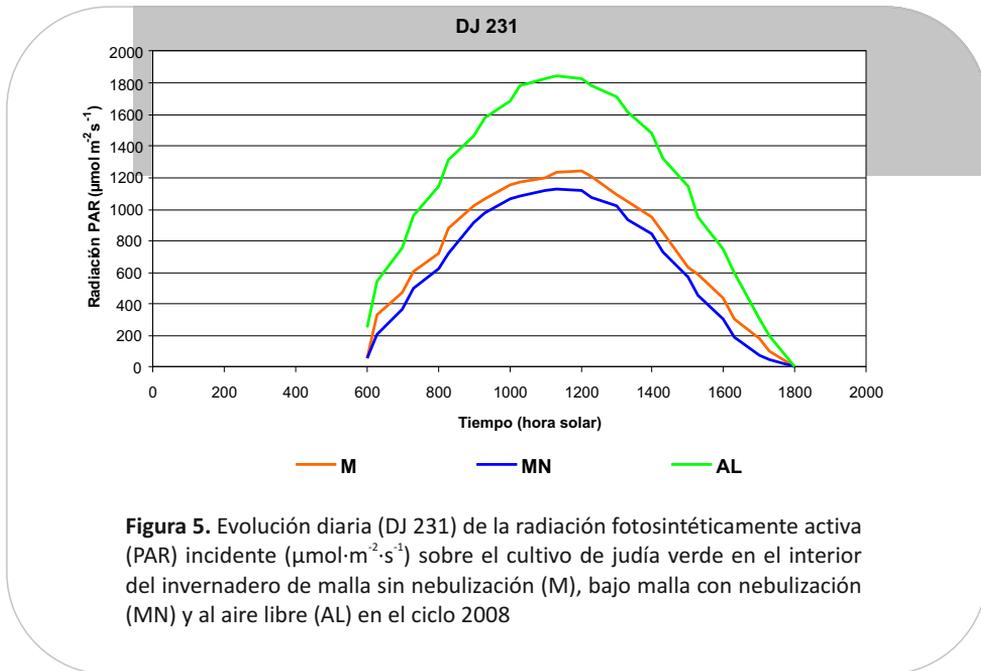




**Figura 4.** Evolución durante el ciclo de cultivo de judía verde de la integral de radiación global acumulada ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ) durante los ciclos 2008 (a) y 2009 (b) en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL)

Los valores de radiación PAR alcanzados en AL (figura 5) están próximos al valor de saturación lumínica de doseles vegetales densos que se produce para intensidades de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de  $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (ó  $1000 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Bakker, 1995).

La malla generó un microclima interior caracterizado también por una importante reducción del valor máximo de radiación PAR respecto a AL (ejemplo: aproximadamente  $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  en M, en la hora de máxima insolación (12:00 horas solares) frente a  $1800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  en AL en un día soleado) (figura 5). La nebulización también redujo la radiación PAR incidente sobre las plantas en el sector del invernadero dotado con este sistema de refrigeración alcanzando diferencias a mediodía (12:00 horas solares) que superan los  $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  respecto a M. Según Urban y Langelez (1992), la reducción de la radiación PAR en invernaderos de plástico por el sistema de nebulización se puede considerar como un efecto negativo, pero mucho menos que otros sistemas de refrigeración como el encalado o el sombreado. En nuestro caso, dada la época de cultivo, el efecto de descenso de temperatura y DPV durante las horas de funcionamiento del sistema, compensan esta pérdida de radiación producida, pues son los principales factores limitantes.



Sin embargo, este descenso de radiación global y PAR no redujo tan marcadamente ni la temperatura ni el DPV de aire registrados en el interior del invernadero respecto al aire libre, como veremos en los siguientes apartados.

## 4.2. Clorofila

La comparación entre orientaciones concluyó que el contenido relativo de clorofila en las hojas de judía verde en los ciclos de cultivo 2008 y 2009 no presentó diferencias significativas entre los sectores este y oeste en los tratamientos estudiados.

El contenido relativo de clorofila en las hojas de judía verde de los sistemas de cultivo M, MN y AL en los ciclos de cultivo 2008 y 2009 aparece en las tablas 1 y 2. Durante el ciclo 2008 se encontraron diferencias significativas de forma aleatoria, a los 49 d.d.s., 63 d.d.s., 84 d.d.s. y 119 d.d.s. En el ciclo 2009, estas diferencias aparecieron a partir de los 75 d.d.s. hasta los 110 d.d.s. con un contenido superior en el sistema AL. En el resto de periodos y para ambos ciclos, el contenido relativo de clorofila registrado en el sistema AL es mayor que en M y MN, aunque no significativamente.

y la temperatura, encontrando como esta última provoca cambios en la aptitud del cultivo para absorber radiación. Estos autores indican que cuando la temperatura es de 25°C los niveles de saturación se alcanzan con  $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  de radiación PAR. Esto parece indicar que incrementar la radiación disponible para el cultivo de judía no es suficiente si esto no lleva a su vez un aumento en la temperatura de crecimiento. En nuestro caso, los niveles de temperatura y de radiación PAR no eran limitantes en las horas centrales del día, aunque si lo eran a primeras y últimas horas (figura 5).

La interacción año x sistema de cultivo no fue significativa. Dentro de cada sistema de cultivo tampoco se encontraron diferencias significativas entre años.

**Tabla 1.** Contenido relativo de clorofila (en unidades directas del medidor SPAD) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

d.d.s.	M	MN	AL
21	37,97a	38,99a	40,91a
28	37,93a	38,45a	43,09a
35	36,12a	34,49a	34,32a
42	40,62a	40,25a	38,44a
49	48,41a	45,33b	42,74c
56	53,23a	50,22a	49,01a
63	48,88c	55,76a	51,06b
70	48,94a	48,13a	45,55a
77	49,43a	48,62a	52,93a
84	48,48c	51,58b	56,09a
91	44,57a	46,11a	53,52a
98	45,51a	41,85a	50,18a
105	49,81a	45,23a	52,37a
112	36,38a	40,34a	45,64a
119	47,22a	43,77b	-
126	38,08a	42,43a	-
133	43,15a	44,87a	-
140	48,66a	48,02a	-
147	50,48a	47,95a	-

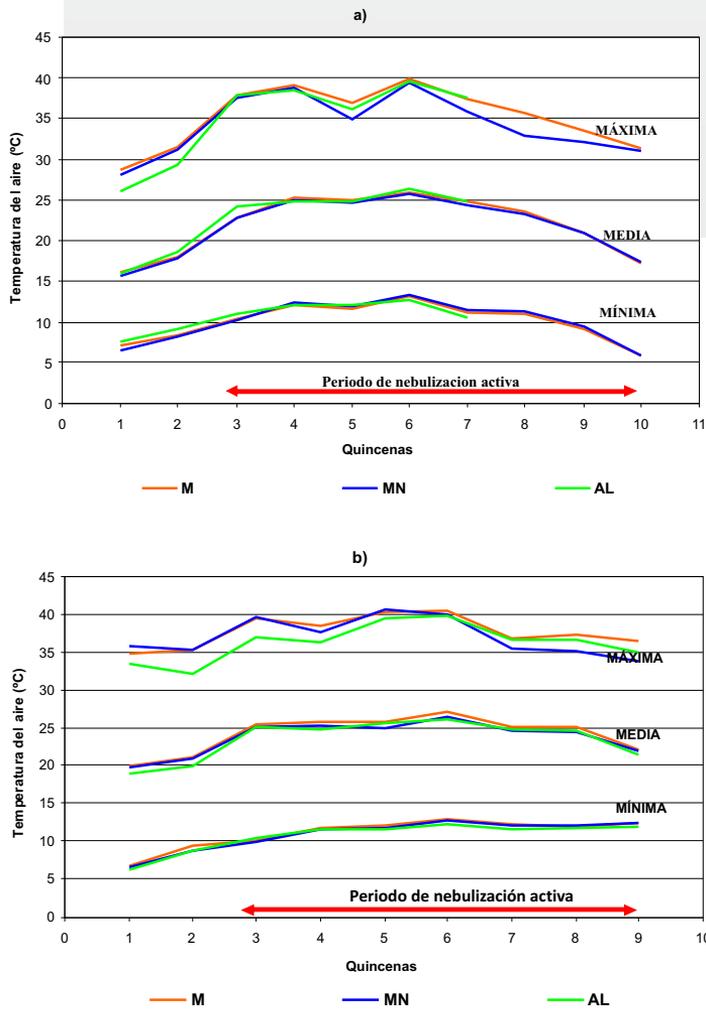
**Tabla 2.** Contenido relativo de clorofila (en unidades directas del medidor SPAD) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

<b>d.d.s.</b>	<b>M</b>	<b>MN</b>	<b>AL</b>
<b>26</b>	39,48a	40,28a	39,79a
<b>33</b>	37,12a	36,06a	37,67a
<b>40</b>	44,86a	44,33a	43,07a
<b>47</b>	48,88a	48,65a	48,89a
<b>54</b>	48,32a	48,07a	49,97a
<b>61</b>	48,71a	49,20a	48,21a
<b>68</b>	48,56a	48,76a	50,84a
<b>75</b>	47,12ac	50,58a	52,11ab
<b>82</b>	49,98c	50,87b	54,12a
<b>89</b>	49,16ab	47,77b	54,68a
<b>103</b>	51,78ab	48,43b	53,78a
<b>110</b>	49,72a	48,25b	53,12a
<b>117</b>	52,92a	45,61a	57,98a
<b>124</b>	51,92a	44,36a	53,22a
<b>131</b>	49,11a	45,76a	52,51a

### 4.3. Temperatura del aire

La evolución de la temperatura media, máxima y mínima del aire durante los ciclos de cultivo de judía verde de los años 2008 y 2009, se muestra en la figura 6a y 6b. En el primer año, la cosecha finalizó antes en el sistema de cultivo AL (109 d.d.s.) por problemas en el sistema de riego y en los sistemas de cultivo bajo malla la duración del ciclo fue de 164 días. El ciclo 2009 tuvo una duración de 135 días en todos los sistemas de cultivo. Los datos de temperatura agrupados en periodos de 15 días, indican un comportamiento térmico de los tres sistemas de cultivo estudiados

similar en lo que se refiere a temperatura media y mínima, mientras que en las temperaturas máximas aparecen diferencias entre ellos debidas al sombreo y la nebulización.



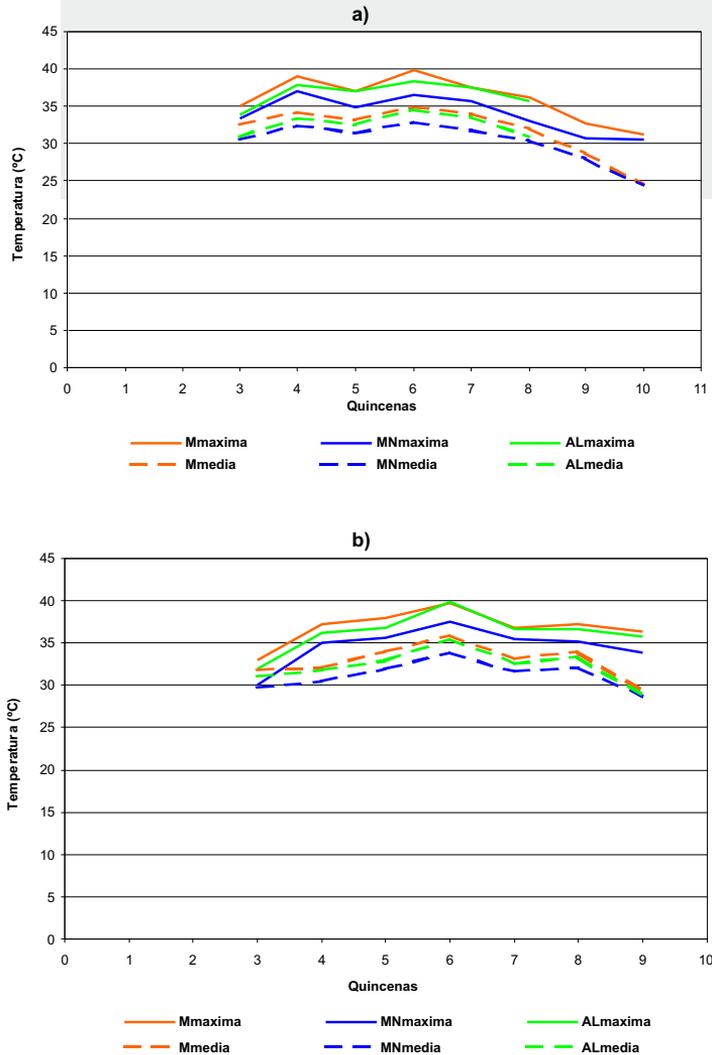
**Figura 6.** Evolución durante el ciclo de cultivo de judía verde de los valores medios quincenales de las temperaturas del aire media, máxima y mínima diarias (°C) en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante los ciclos 2008 (a) y 2009 (b). Controlador de DPV programado para actuar entre las 10:00 y las 16:00 horas solares con una consigna de 2,5 kPa, a partir de la quincena 3

En las quincenas 2 y 3 del ciclo 2008, la temperatura media en AL permaneció por encima de los sistemas bajo malla, manteniéndose similar el resto del ciclo, pero a partir de la quincena 5 del ciclo 2009, AL mantuvo la temperatura media 1 °C aproximadamente por debajo de la registrada en M. Otros autores (Desmarais y col., 1999; Möller y col., 2003; Tanny y col., 2003; Pérez y col., 2006; Santos y col., 2006; Al-Mulla y col., 2008), también llegaron a registrar temperaturas superiores a las exteriores bajo invernaderos de malla. Fatnassi y col. (2002) encontró un aumento importante de la temperatura del aire bajo malla y consideró que era consecuencia de una reducción significativa de la tasa de ventilación. La malla reduce la ventilación al ofrecer resistencia al intercambio de aire entre el exterior y el interior del invernadero, causando mayores pérdidas de presión estática, obteniendo finalmente temperaturas más altas bajo el invernadero (Evans, 2002). Romacho y col. (2006) registraron valores superiores a los 35 °C bajo malla blanca-negra y verde en ciertos periodos del ciclo en cultivo de tomate cherry. Estas altas temperaturas son determinantes de deficiencias en el cuajado de frutos y disminución de producción (Cuartero y col., 2001), como veremos en el capítulo 2.

Las temperaturas máximas del aire en el ciclo 2008 para el sistema de cultivo MN se redujeron alrededor de 2 °C respecto a los sistemas de cultivo M y AL, hacia la mitad del ciclo con valores de temperatura muy elevados (37°C en MN y 39°C en M y AL). Estudios realizados con invernaderos de plástico provistos de sistema de nebulización observaron temperaturas máximas inferiores a las exteriores alcanzando diferencias de hasta 5,5 °C (Gázquez y col., 2006) y 4 °C (Meca y col., 2006). A finales del 2008 se llegaron a alcanzar diferencias de temperatura máxima hasta 3°C aproximadamente entre MN y M. En el ciclo 2009, en que las temperaturas fueron muy elevadas, superando en algunos casos los 40 °C, los sistemas de cultivo MN y M alcanzaron temperaturas máximas muy similares desde el principio y hasta la mitad de ciclo. En cambio, al final de ciclo, cuando las temperaturas extremas se suavizaron, la temperatura de MN se redujo de nuevo hasta 2 °C respecto a M. En ambos ciclos, se superaron los 35 °C de temperatura máxima.

Al comparar los valores de temperatura de aire máximos, medios y mínimos, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

La evolución de la temperatura media y máxima del aire tomando únicamente el periodo de funcionamiento diario programado de la nebulización (de 10:00h a 16:00h solares), se muestra en la figura 7.

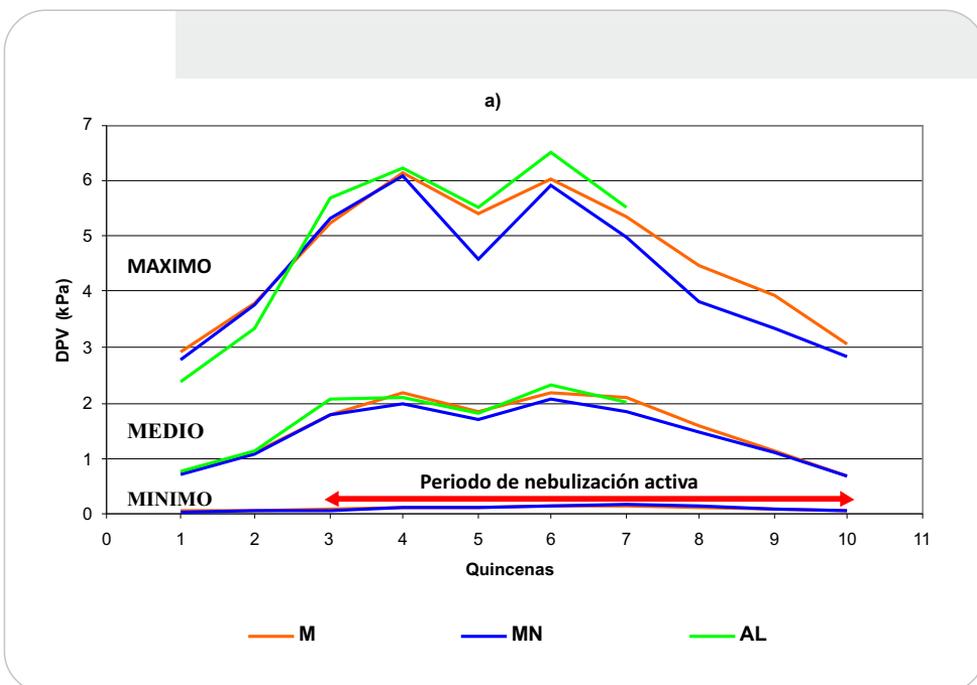


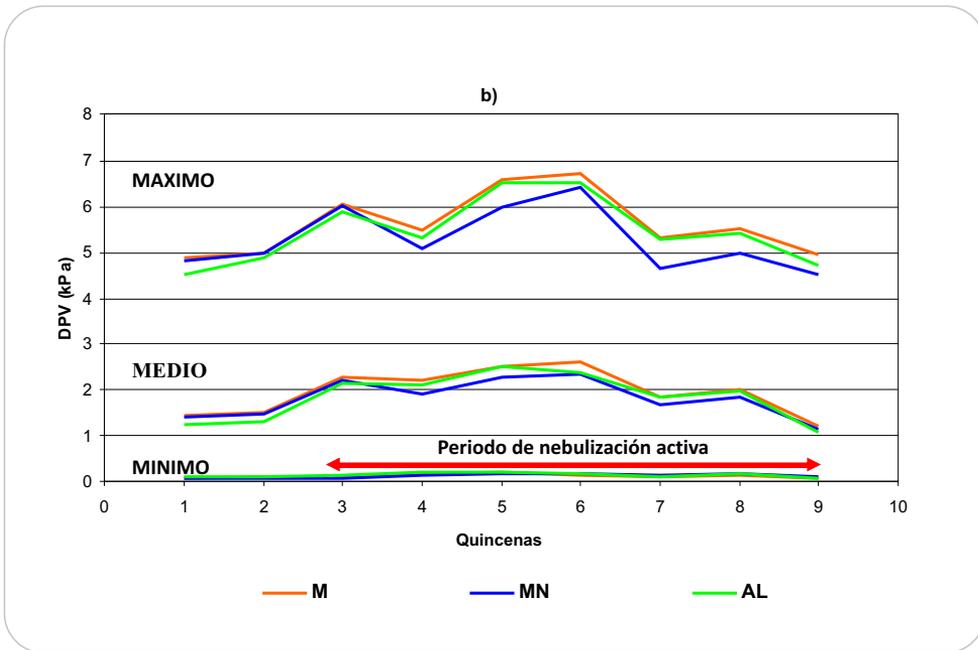
**Figura 7.** Evolución durante el ciclo de cultivo de judía verde de los valores medios quincenales de las temperaturas de aire media y máxima diarias (°C) tomando únicamente el periodo de funcionamiento diario de la nebulización (de 10:00 a 16:00 horas solares) en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante los ciclos 2008 (a) y 2009 (b)

Durante el intervalo de máximas temperaturas diarias (10:00 a 16:00 horas solares) se consiguió un descenso de las temperaturas alcanzadas en MN respecto a M y AL (figuras 7a y 7b). En el ciclo 2008 este descenso fue de hasta 2 °C y 3 °C, en las temperaturas medias y máximas, respectivamente, durante las quincenas de máxima insolación. En el ciclo 2009, caracterizado por las elevadas temperaturas alcanzadas, el sistema de nebulización logró mantener las temperaturas media y máxima 2 °C por debajo de las registradas en M durante todo el periodo. Este descenso de temperatura se ha producido durante el periodo del día en que las plantas están sometidas a un mayor estrés, lo que repercutirá en la producción final obtenida (ver capítulo 2). Las temperaturas media y máxima en el sistema M fueron ligeramente superiores en torno a mediodía solar durante la mayor parte de ambos ciclos a las registradas en AL con diferencias de hasta 1,4 °C en 2008 (figura 7a) y 1,1 °C en 2009 (figura 7b). Al-Mulla y col. (2009) también encontraron temperaturas superiores bajo invernadero de malla respecto al exterior, con diferencias de hasta 1,7 °C.

#### 4.4. Déficit de presión de vapor (DPV)

En la figura 8, se observan los valores medios quincenales del DPV medio, máximo y mínimo diario durante el ciclo de cultivo de judía verde de los años 2008 y 2009.





**Figura 8.** Evolución durante el ciclo de cultivo de judía verde de los valores medios quincenales del déficit de presión de vapor medio, máximo y mínimo diarios (kPa) en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante los ciclos 2008 (a) y 2009 (b). Controlador de DPV programado para actuar entre las 10:00 y las 16:00 horas solares con una consigna de 2,5 kPa

Durante el ciclo 2009 los valores de DPV máximos y medios se mantuvieron próximos a 6 kPa y 2 kPa respectivamente, durante un periodo más largo que en 2008 y sin bajadas a principios y finales del ciclo. Así, se alcanzaron DPV máximos mayores de 4 kPa durante 8 quincenas en 2009 frente a 5 quincenas en 2008 y DPV medios superiores a 2 kPa se mantuvieron durante 5 quincenas en 2009 respecto a 3 quincenas en 2008. Así pues, se alcanzaron condiciones climáticas más extremas durante todo el ciclo 2009.

En ambos ciclos, el DPV máximo en el sistema de cultivo M ha superado en algún momento los 6 kPa, coincidiendo con Romacho y col. (2006) bajo los tratamientos de malla blanca-negra y malla verde en un ciclo de primavera-verano de un cultivo de tomate cherry. La nebulización bajo malla consigue reducir en la quincena 5 alrededor de 1 kPa los valores máximos de DPV registrados respecto a los sistemas de cultivo M y AL en el ciclo 2008 y en los últimos periodos del ciclo, 0,6 kPa

aproximadamente. En el ciclo 2009, en periodos del ciclo donde se alcanzan valores muy elevados de temperatura y baja humedad relativa (41 °C y 10% aproximadamente), a partir de la quincena 4, la nebulización mantiene los valores de DPV inferiores al resto de sistemas de cultivo, alcanzando un mayor descenso en la quincena 7 (0,65 kPa). Gázquez y col. (2006) sólo encontraron descensos de DPV máximo de 0,2 kPa en un invernadero plástico con sistema de nebulización respecto al exterior.

El DPV medio presentó una tendencia muy parecida en los sistemas de cultivo bajo malla durante los dos ciclos, permaneciendo el valor del sistema MN por debajo del valor de M, a partir de la quincena 3. En AL, el DPV medio se mantuvo con valores próximos a M y MN durante ambos ciclos.

En cuanto al DPV mínimo, las diferencias son muy pequeñas, manteniéndose MN por debajo de M, 0,02 kPa aproximadamente durante ambos ciclos de cultivo.

Conforme avanzó el ciclo 2008, el índice de área foliar (LAI) en el sistema MN aumentó respecto a M (capítulo 2). Este índice influye en el DPV del invernadero, y es que, a medida que el LAI aumenta, el efecto de nebulización sobre la reducción de la transpiración disminuye, dado que el nivel de humedad en un invernadero con un cultivo plenamente desarrollado es mayor y la necesidad de aportar vapor de agua al aire menor (Montero y col., 2003).

Al comparar los valores de DPV máximos, medios y mínimos, no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos.

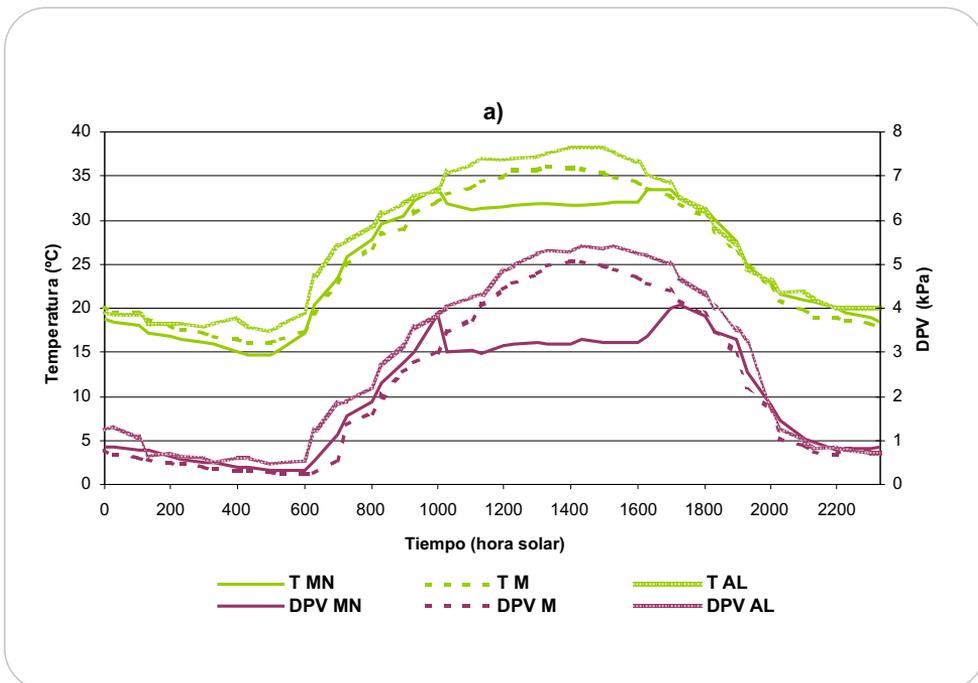
En la figura 9, se puede observar el salto térmico y de DPV producido por la activación y desactivación del sistema de nebulización en un día caluroso de los ciclos 2008 (figura 9a) y 2009 (figura 9b), respectivamente. Este salto térmico está alrededor de 3 °C, y el diferencial de DPV está próximo a 1,5 kPa, para ambos ciclos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Katsoulas y col. (2006) en un cultivo de pimiento bajo plástico con nebulización activa desde las 10:00h a las 18:00h el 31 de agosto (latitud 39°N). El salto térmico también coincide con el obtenido por Hirai y col. (2008) en un cultivo de té verde bajo malla provisto de un sistema de nebulización activado de forma intermitente desde las 12:00h a las 14:00h el 17 de agosto (latitud 33°N).

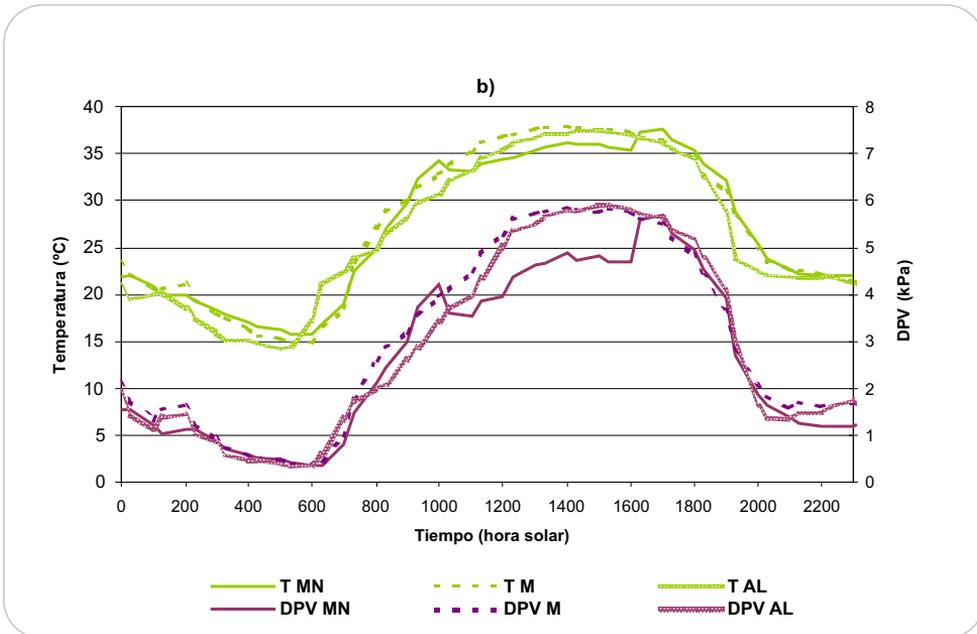
En la figura 9b, se observa un cambio de pendiente según los niveles de temperatura y humedad. En el día juliano 220 (ciclo 2008) se consigue mantener la temperatura y DPV constantes (31 °C y 3 kPa, respectivamente). En 2009 (figura 9b), sin embargo, el DPV y la temperatura no se mantienen constantes hasta las 13:00h aproximadamente, ya que se está produciendo un incremento muy importante y continuado en la temperatura exterior y un descenso muy drástico en

la humedad relativa exterior. Tal vez una menor frecuencia de pulsos habría mejorado el control en este último ciclo.

Durante las horas de funcionamiento del sistema de nebulización, se consiguen diferencias máximas de DPV próximas a 2 kPa y a 1,3 kPa en 2008 y 2009 respectivamente, frente a los tratamientos M y AL.

Si comparamos los datos de temperatura con los obtenidos en un invernadero mediterráneo de plástico dotado de un sistema de nebulización de alta presión, observamos que en un día de verano (24 de agosto) a las 14:00 h (latitud 36,5 °N), se alcanzan temperaturas próximas a 37 °C (Gázquez y col., 2010), en cambio, en nuestro caso, el sistema de nebulización de baja presión en invernadero de malla alcanza, a esa misma hora, valores próximos a 31 °C (temperatura bajo malla, 35,8 °C y temperatura exterior, 37 °C) en 2008 y 35,5 °C en 2009 (temperatura bajo malla, 37 °C y temperatura exterior, 38 °C). Hirai y col. (2008) alcanzaron, el 17 de agosto (latitud 33 °N), temperaturas próximas a los 35 °C bajo malla con nebulización a las 14:00h (temperatura exterior, 38 °C).





**Figura 9.** Valores de temperatura del aire (°C) y DPV (kPa) medidos en el interior del invernadero de malla con nebulización (MN), bajo malla sin nebulización (M) y al aire libre (AL) para los Días Julianos a) 220 (quincena 7 del ciclo 2008) y b) 211 (quincena 6 del ciclo 2009). Controlador de DPV programado para actuar entre las 10:00 y las 16:00 horas solares con una consigna de 2,5 kPa

No se conocen estudios concretos que determinen los valores máximos de DPV que se pueden alcanzar sin que un cultivo de judía verde sufra estrés. El valor programado de consigna de DPV en nuestro estudio fue de 2,5 kPa. Teniendo en cuenta la temperatura máxima biológica de la judía (35 °C) (MARM, 2008) y el DPV máximo elegido (2,5 kPa), la humedad relativa necesaria para obtener dicho DPV sería de 55,5% (ecuaciones 1 y 2). Mantener valores más bajos de DPV (1,5 kPa y 2 kPa) con nebulización de baja presión, proporcionaría humedades muy altas en el invernadero y permanencia de agua sobre las hojas, ocasionando enfermedades por hongos. Estos resultados coinciden con Montero y col. (2003) para valores por debajo de 1,5 kPa de DPV en un invernadero plástico en condiciones mediterráneas usando un sistema de nebulización de baja presión. En el

caso del cultivo de tomate se intenta mantener el DPV por debajo de 2,5 kPa, pues por encima de este valor, comienza el cierre de los estomas (Heuvelink y Dorais, 2005).

De cualquier forma, el controlador no consiguió mantener la consigna establecida de 2,5 kPa en las horas centrales del día. Las altas temperaturas y bajas humedades registradas en el exterior (40-41 °C y 10-15% de humedad) junto con la malla de cubierta utilizada de 9x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, ha permitido que una gran parte del agua se pierda hacia el exterior a través de los poros. Es posible que la utilización de mallas más densas, que limiten la ventilación consigan descensos más acusados del DPV y menor consumo de agua, si bien habría que estudiar sus efectos en la limitación de radiación transmitida (ver capítulo 4) y en la ventilación en los periodos en que la nebulización no está activa, que podría provocar un calentamiento del aire interior (Desmarais y col., 1999; Möller y col., 2003; Santos y col., 2006; Majdoubi y col., 2007). Sí sería interesante, sin embargo, probar estrategias de duración de pulsos diferentes para intentar mejorar el control del DPV en las horas centrales del día.

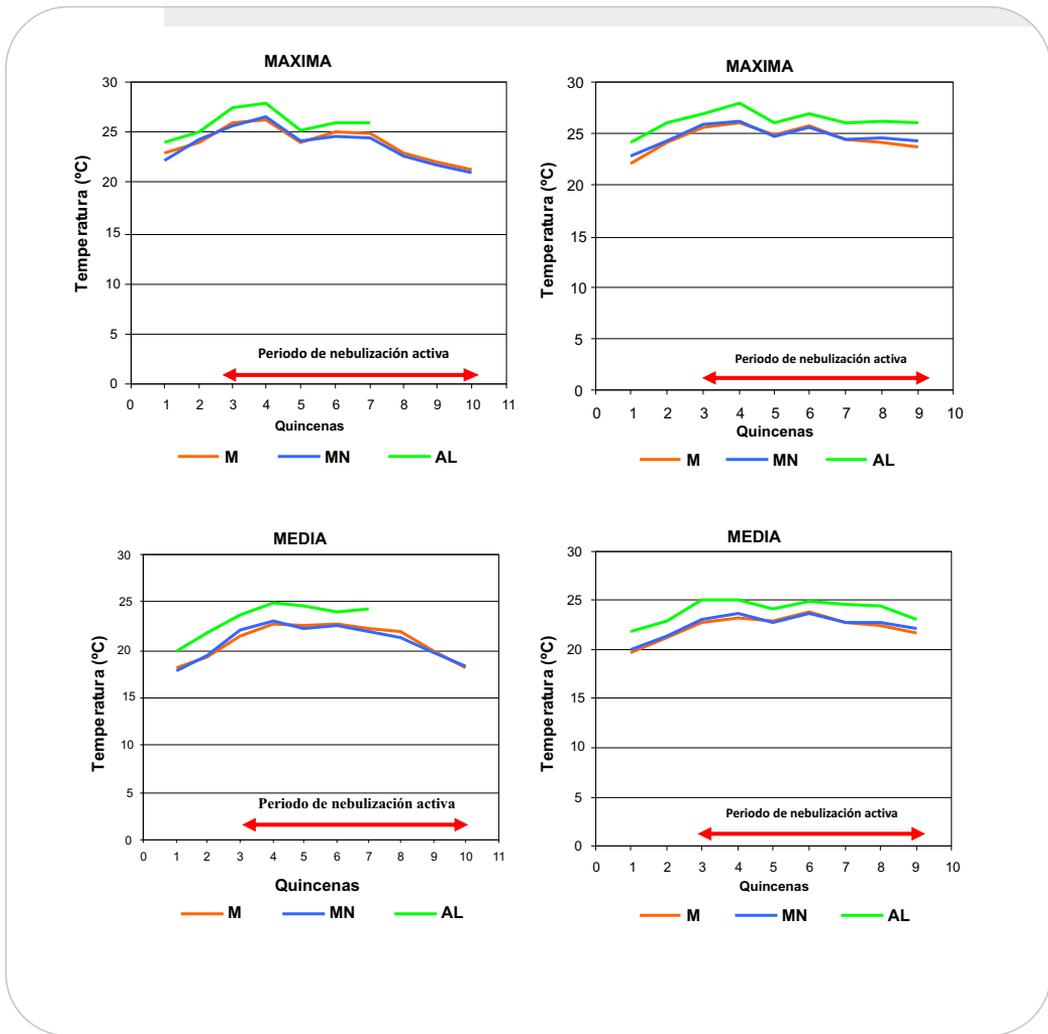
En algunas ocasiones, la nebulización produjo goteos sobre las hojas pero el controlador actuaba en ciclos cortos, como se ha mencionado anteriormente, con lo que se consiguió un secado parcial de las hojas y los problemas derivados del exceso de humedad no fueron importantes. Sí se observaron, sin embargo, depósitos de sales sobre las hojas de las plantas situadas inmediatamente bajo las boquillas, a pesar de la utilización de un descalcificador. No se cuantificó, sin embargo, el posible efecto negativo de estas sales sobre las plantas.

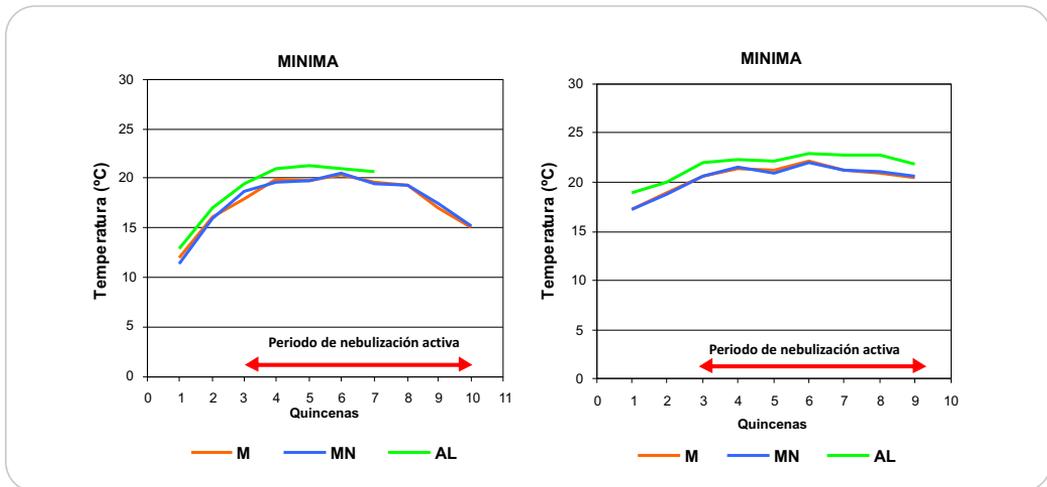
El consumo de agua total en el sistema de nebulización fue de 174,5 Lm<sup>-2</sup> y 229,9 Lm<sup>-2</sup> en 2008 y 2009, respectivamente. Los valores son superiores para el ciclo 2009, a pesar de tener menos duración, debido a las mayores temperaturas que se registraron en ese ciclo y que produjeron unos valores de DPV superiores durante un periodo de tiempo más prolongado que en 2008 (figura 9). Estas condiciones climáticas también afectaron al dosel vegetal (apartado 4.6.)

Como el agua es un recurso escaso en muchas zonas de producción de invernadero de malla, sería recomendable disponer de una instalación de recogida de agua de lluvia para ser utilizada para la nebulización. Esta opción es doblemente interesante dado que para un buen mantenimiento de la instalación nebulizadora es necesario contar con aguas de calidad para evitar posibles obturaciones de las boquillas. Un problema a tener en cuenta es la dureza del agua (en nuestras condiciones, 522 mg de carbonato cálcico/L), por lo que es preciso un sistema de descalcificación o eliminación de sales. Otros sistemas más eficaces (ósmosis inversa), no se utilizan dado su alto coste.

## 4.5. Temperatura de suelo

Las temperaturas medias, máximas y mínimas del suelo bajo acolchado con rafia negra de polietileno en los sistemas de cultivo MN, M y AL durante los ciclos 2008 y 2009, se muestran en la figura 10. El comportamiento térmico edáfico de los sistemas bajo malla es similar, observándose mayores diferencias respecto al sistema al aire libre, que muestra siempre valores superiores de temperatura media (hasta 4 °C durante el ciclo 2008 y 2 °C en los periodos más cálidos del ciclo 2009).





**Figura 12.** Evolución durante el ciclo de cultivo de judía verde de los valores medios quincenales de las temperaturas media, máxima y mínima del suelo diarias (°C) en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) (izquierda 2008, derecha 2009)

La temperatura máxima de suelo en AL fue mayor que en los sistemas de cultivo bajo malla, hasta 2 °C y 3 °C aproximadamente en ambos ciclos. En cuanto a las temperaturas mínimas del suelo en AL también fueron entre 1 °C y 2 °C superiores a los sistemas bajo malla en ambos ciclos de cultivo.

Estas temperaturas de suelo superiores se producen por la absorción de todas las longitudes de onda larga de la radiación solar por el acolchado negro y por la conducción suelo-plástico que transmite parte del calor al suelo, aumentando así su temperatura (Suárez-Rey y col., 2008). El acolchado de los sistemas M y MN, al encontrarse bajo la malla recibió menos radiación solar.

A medida que avanza el cultivo durante el ciclo 2008, se observa una disminución de las temperaturas de suelo en los sistemas de cultivo M y MN (no en AL ya que el ciclo terminó antes de producirse este descenso). En este descenso de temperatura juega un papel importante la cobertura vegetal que sombrea el acolchado y reduce la incidencia de radiación y, por tanto, el calentamiento del suelo (Vázquez, 2004). No ocurre lo mismo durante el ciclo 2009, donde los valores de temperatura se mantienen más o menos constantes a lo largo del ciclo debido a que la cobertura vegetal fue inferior a la del años anterior.

Aunque la temperatura óptima del suelo, para planta de judía está entre los 15 °C y los 20 °C (Serrano, 1990), en la figura 12 se observan temperaturas máximas de hasta 26 °C en los sistemas de cultivo bajo malla y hasta 28 °C al aire libre. En este sentido, sería recomendable utilizar un acolchado bicapa (blanco en la cara superior para reflejar la radiación y negro en la capa inferior para evitar la nascencia de malas hierbas) o acolchados con mayor poder de reflexión (Escobar, 2004). En cualquier caso, el material debería ser similar al polifibril empleado en cuanto a resistencia y durabilidad (5 ciclos).

#### 4.6. Temperatura de hoja

En cuanto a la comparación de los valores de temperatura de hoja en el haz y envés, entre los sectores este y oeste de los tratamientos estudiados, no hubo diferencias significativas durante los ciclos 2008 y 2009.

En las medidas realizadas a primera hora y mitad de la mañana (6:00 y 9:00 horas solares), se pudo apreciar una ligera reducción en la temperatura de hoja (no significativa) de los sistemas de cultivo bajo malla, tanto en el haz como en el envés, de entre 2 °C y 4°C respecto al sistema AL en los dos ciclos de cultivo (tablas 3 y 4).

Las diferencias significativas de temperatura foliar las observamos en las medidas realizadas a mediodía solar (12:00h), hora de máxima insolación, cuando el sistema de nebulización estaba en funcionamiento, como cabía esperar.

**Tabla 3.** Temperatura del haz y envés de la hoja a las 12:00 horas solares, en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) a principios (día 12 después de la siembra), mediados (día 40 después de la siembra) y finales (día 75 después de la siembra) del ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

CICLO 2008	HAZ			ENVÉS		
	M	MN	AL	M	MN	AL
<b>Principio (12 d.d.s.)</b>	27,5b	25,9b	35,6a	27,1b	25,5b	35,4a
<b>Medio (48 d.d.s.)</b>	24,6b	23,0c	31,9a	25,0b	22,7c	32,5a
<b>Final (75 d.d.s.)</b>	27,6b	30,4c	30,6a	28,9b	30,1c	31,9a

**Tabla 4.** Temperatura del haz y envés de la hoja a las 12:00 horas solares, en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) a principios (día 8 después de la siembra), mediados (día 55 después de la siembra) y finales (día 87 después de la siembra) del ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

CICLO 2009	HAZ			ENVÉS		
	M	MN	AL	M	MN	AL
<b>Principio (8 d.d.s.)</b>	28,3b	29,5b	33,3a	33,2b	32,4b	35,6a
<b>Medio (55 d.d.s.)</b>	27,2b	26,4c	31,6a	27,4b	26,5c	31,1a
<b>Final (87 d.d.s.)</b>	24,8b	22,6c	34,0a	24,7b	22,8c	33,5a

Si comparamos las temperaturas de hoja de los sistemas de cultivo M y AL del ciclo 2008, observamos que la malla reduce la temperatura alrededor de 8 °C, 7 °C y 3 °C tanto en el haz como en el envés a principios, mediados y finales de ciclo, respectivamente. Una tendencia similar, se observa en el ciclo 2009, donde se aprecian reducciones de temperatura de hoja de 5 °C en el haz y 2,4 °C en el envés, a principios de ciclo, de aproximadamente 4 °C tanto en el haz como en el envés a mediados de ciclo y de 9 °C (haz y envés) a finales del ciclo, en el sistema M respecto a AL. Así pues, un efecto de la malla de sombreo sobre el cultivo es la reducción de la temperatura de hoja. Castilla (2007) y López-Marín y col. (2009b) indican que el mayor aporte energético propiciado por altos niveles de radiación, puede incidir en el incremento del calentamiento de las hojas aumentando el consumo de agua, pudiendo llegar a generar desecación en casos extremos.

La nebulización también redujo significativamente la temperatura de hoja (en haz y envés) de MN respecto a M desde su activación a los 45 d.d.s. Esta reducción llegó hasta los 2,8 °C a finales del ciclo 2008 en el haz, resultados similares a los obtenidos por Hirai y col. (2008) en un cultivo de hojas de té verde bajo malla y por Katsoulas y col. (2006) en hojas de pimiento bajo plástico. Durante el resto de periodos de ambos ciclos, la reducción de la temperatura de hoja se mantuvo entre valores próximos a 1 °C y 2 °C (coincidiendo con Tanny y col., 2008), tanto en el haz como en el envés. Las diferencias significativas son más acusadas si comparamos los sistemas de cultivo extremos (MN

y AL), llegando a alcanzar los 8,9 °C (haz) y los 9,8 °C (envés) a mediados del ciclo 2008 y los 11,4 °C (haz) y los 10,7 °C (envés) a finales del ciclo 2009.

La interacción año x sistema de cultivo no fue significativa, ni en el haz ni en el envés. Dentro de cada sistema de cultivo, sólo se observan diferencias en AL entre años, en cuanto a la temperatura en el haz. Al comparar los valores de temperatura de hoja de los tres sistemas de cultivo de cada año, la temperatura de hoja en el haz y en el envés es significativamente superior en AL que en MN.

Por tanto, el sistema de refrigeración por nebulización bajo malla, demostró su eficacia en la reducción de la temperatura del dosel vegetal. Por el contrario, en invernaderos de plástico, los sistemas de nebulización refrigeran el aire pero no el cultivo (reduciendo la tasa de transpiración) por lo que precisan, además, de una adecuada ventilación para mantener una buena temperatura de hoja (Arbel y col., 1999; Gázquez y col., 2006; Montero, 2006; Gázquez y col., 2008).

## 5. Conclusiones

- El microclima interior generado por la malla está caracterizado por una reducción importante de los valores de radiación global y PAR. En el sistema de cultivo MN las gotas dispersas en el aire por la nebulización redujeron aún más la radiación. El efecto de descenso de temperatura y DPV durante las horas de funcionamiento de la nebulización, compensan esta pérdida de radiación producida.

- El contenido relativo de clorofila registrado en el sistema AL es mayor que en M y MN, aunque no significativamente.

- El sistema de nebulización de baja presión empleado, mejoró el microclima interior bajo malla y permitió reducir la temperatura y DPV máximos en las horas de mayor radiación y demanda evaporativa (10:00 a 16:00 horas solares).

- El controlador IRTA-IFAPA® es adecuado y eficaz, pero para optimizar su funcionamiento en condiciones extremas, sería necesario adaptar el programa variando la consigna de DPV a lo largo del día, la duración de los pulsos y aumentando el tiempo de funcionamiento del sistema, para conseguir descensos de temperatura detectables durante todo el día.

- Las mayores temperaturas de suelo se produjeron en el sistema de cultivo AL, debido a la mayor absorción de radiación solar por el acolchado negro y a la conducción suelo-plástico que transmite parte del calor al suelo.

- La reducción de la radiación incidente sobre el cultivo producida por la malla disminuyó la temperatura de hoja respecto al exterior. El sistema de refrigeración por nebulización bajo malla demostró también su eficacia reduciendo aún más la temperatura de hoja.

## 6. Bibliografía

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: 869-877.

Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier, A. 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *International Commission on Irrigation and Drainage* Vol. 43. Nº 2 pag. 35-82.

Al-Mulla, Y.A., Al-Balushi, M., Al-Rawahy, M., Al-Raisy, F., Al-Makhmary, S. 2008. Screenhouse microclimate effects on cucumber production planted in soilless culture (open system). *Acta Horticulturae* 801: 637-644.

Al-Mulla, Y.A., Al-Balushi, M., Al-Rawahy, M., Al-Makhmary, S., Al-Raisy, F. 2009. Evaluation of microclimatological parameters inside a screenhouse used in arid regions. *GreenSys 2009* (en prensa).

Arbel, A., Yekutieli, O., Barak, M. 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72 (2): 129-136.

Arbel, A., Shklyar, A., Barak, M. 2000. Buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Acta Horticulturae* 534: 327-334.

Baille, A. 2001. Trends in greenhouse technology for improved climate control in mild winter climates. *Acta Horticulturae* 559: 161-167.

Bakker, C. 1995. Greenhouse climate control: constraints and limitations. *Acta J Horticulturae* 399: 25-35.

Caparrós, I., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C., Botelho, R., Lorenzo, P. 2005. El sombreado móvil exterior del invernadero: efecto sobre el microclima, la eficiencia en el uso del agua y la producción de un cultivo de pepino bajo diferentes niveles de salinidad de la solución nutritiva. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5: 91-97.

Casadesús, J., Montero, J.I., Soriano, T., Muñoz, P., Antón, A., Hernández, J., Escobar, I., Castilla, N. 2008. Disposición para el control del clima en invernaderos y estructura similares de protección de cultivos. *Boletín Oficial de la propiedad industrial*. 01-01-2008. pag. 288.

Castilla, N. 1994. Greenhouse in the Mediterranean area: technological level and strategic management. *Acta Horticulturae* 361: 44-56.

Castilla, N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. 462 pp.

Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R., González-Fernández, J.J. 2001. Estreses abióticos en: El cultivo del tomate. Mundi-Prensa. Madrid. 351-383.

Desmarais, G., Ratti, C., Raghavan, G.S.V. 1999. Heat transfer modeling of screenhouses. *Solar Energy* 65 (5): 271-284.

Escobar, I. 2004. Acolchado de suelo con plásticos reflectantes en el cultivo de judía de mata baja en invernadero. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 178 pp.

Evans, L. 2002. Screens-Back to basics. National greenhouse manufactory association, USA.

Fatnassi, H., Boulard, T., Demrati, H., Bouirden. L., Sappe, G. 2002. Ventilation performance of a large canarian type greenhouse equipped with insect-proof. *Biosystems Engineering* 82(1): 97-105.

Fleisher, D.H., Logendra, L.S., Moraru, C., Both, A., Cavazzoni, J., Gianfagna, T., Lee, T. and Janes, H.W. 2006. Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) quality and production scheduling. *Journal Horticultural Science and Biotechnology* 81 (1): 125-131.

Gázquez, J.C., López, J.C., Baeza, E., Sáez, M., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Lorenzo, P. 2006. Yield response of a sweet pepper crop to different methods of greenhouse cooling. *Acta Horticulturae* 719: 507-514.

Gázquez, J.C., López, J.C., Pérez-Parra, J., Baeza, E., Sáez, M., Parra, A. 2008. Greenhouse cooling strategies for Mediterranean climate areas. *Proceedings of the International Symposium on High Technology for Greenhouses System Management. Acta Horticulturae* 801: 425-431.

Gázquez, J.C., López, J.C., Pérez-Parra, J., Baeza, E. 2010. Refrigeración por evaporación de agua. En: *Manejo del clima en el invernadero mediterráneo*. Ed: Sánchez-Guerrero, M.C., Alonso, F.J., Lorenzo, P., Medrano, E.: 57-79.

Gómez, K. and Gómez, A. 1984. *Statistical procedures for agricultural research*. John Wiley and sons. New York. 680 pp.

Heuvelink, E. and Dorais, M. 2005. Crop growth and yield: 85-144. In: Heuvelink, E. (ed) *Tomatoes*. CABI Publishing. London. 352 pp.

Hirai, M., Yoshikoshi, H., Kitano, M., Wakimizu, K., Sakaida, T., Yoshioka, T., Nitabaru, J., Nakazono, K., Hayashi, M., Maki, T. 2008. Production of value-added crop of green tea in summer under the shade screen net : canopy microenvironments. *Acta Horticulturae* 797: 411-417.

Hita, O., Romero-Gámez, M., Soriano, T., Morales, M.I., Suárez-Rey, E., Castilla, N. 2007. Estudio microclimático y productivo de dos paquetes tecnológicos para invernaderos mediterráneos con tomate cherry. *XXXVII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura*: 1065-1072.

Ho, L.C. 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal Experimental Botany* 47: 1239-1243.

Janssen, H.J.J., Gieling, Th.H., Sarlikioti, V., Meurs, B., Ruijsch van Dugteren, J. 2007. Hydrion-line, a prototype crop light interception sensor in greenhouses. Greensys 2007. Book of abstracts: 309.

Júdez, A. 1991. Notas sobre el diseño de experimentos con aplicación a la investigación con cultivos protegidos. En: López-Gálvez, J., Díaz-Álvarez, J.R. (ed). Curso Internacional sobre agrotecnia del cultivo en invernaderos. FIAPA-IFA: 345-410.

Katsoulas, N., Kitta, E., Kittas, C., Tsirogiannis, I.L., Stamati, E., Savvas, D. 2006. Greenhouse cooling by a fog system: effects on microclimate and on production and quality of a soilless pepper crop. *Acta Horticulturae* 719: 455-461.

Kittas, C., Rigakis, N., Katsoulas, N., Bartzanas, T. 2009. Influence of shading screens on microclimate, growth and productivity of tomato. *Acta Horticulturae* 807: 97-102.

Laing, W.A., Greer, D.H., Schnell, T. 1995. Photoinhibition of photosynthesis causes a reduction in vegetative growth rates of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris*) plant. *Australian Journal Plant Physiology* 22: 511-520.

López-Marín, J., Rodríguez, C.M., Gálvez, A., Martínez, E., González, A. 2009a. Influencia de la reducción solar en la calidad del fruto en un cultivo de pimiento en invernadero. *Acta de Horticultura* 54: 532-536.

López-Marín, J., Gálvez, A., Espinosa, M.F., González, A. 2009b. Respuesta de un cultivo de pimiento en invernadero a la utilización de diversos sistemas de sombreo. *Acta de Horticultura* 54: 521-526.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., García, M.L., Caparrós, I., Giménez, M. 2003. External greenhouse mobile shading: Effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 609: 181-186.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., García, M.L., Caparrós, I., Coelho, G., Giménez, M. 2004. Climate control in the summer season: A comparative study of external mobile shading and fog system. *Acta Horticulturae* 659: 189-194.

Majdoubi, H., Boulard, T., Hanafi, A., Bekkaoui, A., Fatnassi, H., Demrati, H., Nya, M. Bouirden, L. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. *Transactions of the ASAE* 50(2): 641-650.

MARM 2008. Anuario de Estadística Agroalimentario del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid 2009. 1150 pp.

Maroto, J.V. 2002. Horticultura herbácea especial. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 611 pp.

Meca, D., López, J.C., Gázquez, J.C., Baeza, E., Pérez-Parra, J., Zaragoza, G. 2006. Evaluation of two cooling systems in parral type greenhouses with pepper crops: low pressure fog system verses whitening. *Actas Horticulturae* 719: 515-519.

Meca, D., López, J.C., Gázquez, J.C., Baeza, E., Pérez-Parra, J., Zaragoza, G. 2007. A comparison of three different cooling systems in parral type greenhouses in Almeria. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5(3):285-292.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S., Teitel, M. 2003. Micrometeorological characterization in a screenhouse. *Acta Horticulturae* 614: 445-451.

Möller, M., Tanny, J., Li, Y., Cohen, S. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127: 35-51.

Möller, M. and Assouline, S. 2007. Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science* 25: 171-181.

Montero, J.I., Antón, A., Muñoz, P. 2003. Nebulización: Efectos sobre el microclima, producción eficiencia en el uso del agua. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Ed. Fernández, M. Lorenzo, P. Cuadrado, I. Curso Superior de Especialización vol. 7. Almería: 231-243.

Montero, J.I. 2006. Evaporative cooling in greenhouse: effect on microclimate, water use efficiency and plant response. *Acta Horticulturae* 719: 373-384.

Morales, M.I., Romero, M., Soriano, T., Escobar, I., Hernández, J., Martín, A., Peláez, M., Castilla, N. 2006. Transmisividad a radiación solar de mallas para invernaderos. *Actas de Horticultura* 46: 9-12.

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): 365-374.

Mutwiwa., U.N. and Tantau, H.J. 2009. Insect screens for integrated plant protection in greenhouses. *Acta Horticulturae* 807: 85-90.

Nisen, A., Grafiadelis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez, P.F., Monteiro, A., Verodt, H., Villele, O., von Zabeltitz, C., Denis, J.C., Baoudoin, W., Garnaud, J.C. 1988. Cultures protégées en climat méditerranéen. *Plant production and protection paper FAO nº 90*. Roma. 317 pp.

Papadakis, J. 1960. *Geografía agrícola mundial*. Salvat Editores S.A. Barcelona. 649 pp.

Peet, M.M., Willits, D.H., Gardner, R. 1997. Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomatoes of chronic, sub-acute high temperature stress. *Journal of Experimental Botany* 48 (306): 101-111.

Pérez, M., Plaza, B.M., Jiménez, S., Lao, M.T., Barbero, J., Bosch, J.L. 2006. The radiation spectrum through ornamental net houses and impact on the climate generated. *Acta Horticulturae* 719: 631-636.

Romacho, I., Hita, O., Soriano, T., Morales, M.I., Suárez-Rey, E.M., Peláez, M., Hernández, H., Escobar, I., Castilla, N. 2005. Invernaderos de malla para cultivos estivales en comarcas no litorales: caracterización microclimática evaluación productiva del cultivo de tomate tipo cereza. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5, Vol. 1: 378-383.

Romacho, I., Hita, O., Soriano, T., Morales, M.I., Escobar, I., Suárez-Rey, M., Hernández, H., Castilla, N. 2006. The Growth and Yield of Cherry Tomatoes in Net Covered Greenhouses. *Acta Horticulturae* 719: 529-534.

Romero-Gómez, M., Casadesús, J., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N., Antón, A., Muñoz, P., Montero, J.I. 2008a. Sistemas de nebulización de baja presión en cultivos estivales bajo mallas plásticas. *Agrícola Vergel* 319: 340-344.

Romero-Gómez, M., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N., Soriano, T., Casadesús, J., Antón, A., Montero, J.I. 2008b. Refrigeración activa en invernaderos de malla para producción hortícola protegida en el periodo estival. *Horticultura* 207: 10-20.

Romero-Gómez, M., Soriano, T., Casadesús, J., Suárez-Rey, E.M., Antón, A., Montero, J.I., Castilla, N. 2009. Estudio de estrategias de refrigeración por nebulización de baja presión en el microclima de un invernadero de malla. *Acta de Horticultura* 54: 499-504.

Salveit, 2005. Fruit Ripening and Fruit Quality. In: Tomatoes. Ed: E. Heuvelink. CABI Publishing. Cambridge. USA: 145-170.

Santos, B., Rios, D., Nazco, R. 2006. Climatic conditions in tomato greenhouse in Tenerife (Canary Island.). *Acta Horticulturae* 719: 215-221.

Serrano, Z. 1990. Técnicas de invernadero. Ed. PAO. Suministros Gráficos S.A. Sevilla. 644 pp.

Soriano, T. Morales, M.I., Suárez-Rey, E., Escobar, I., Hita, O., Romacho, I., Hernández, J., Castilla, N. 2006a. Comparación de dos paquetes tecnológicos para invernaderos mediterráneos con cultivo de tomate tipo cereza. *Actas de Horticultura* 46: 1-4.

Soriano, T., Morales, M.I., Hita, O., Romacho, I. 2006b. Cultivos estivales bajo mallas plásticas. *Horticultura* 192: 14-18.

Suárez-Rey E.M., Moyano, J.E., Romero-Gómez, M., Montosa, J.M., Morales, M.I., Castilla, N., Soriano, T. 2008. Técnicas de semiforzado en el cultivo de lechuga iceberg. *Horticultura* 209: 30-39.

Tanny, J., Cohen, S., Teitel, M. 2003. Greenhouse microclimate and ventilation: a experimental study. *Biosystems Engineering* 84 (3): 331-341.

Tanny, J., Haijun, L, Cohen, S. 2006. Airflow characteristics, energy balance and eddy covariance measurements in a banana screenhouse. *Agriculture and Forest Meteorology* 139: 105-118.

Tanny, J., Teitel, M., Barak, M., Esquira, Y., Amir, R. 2008. The effect of height on screenhouse microclimate. *Acta Horticulturae* 801: 107-114.

Urban, L. and Langelez, I. 1992. Effect of high pressure mist on leaf water potential, leaf diffusive conductance, CO<sub>2</sub> fixation and production of Sonia rose plants grown in rockwool. *Scientia Horticulturae* 50: 229-244.

Vázquez, N. 2004. Evaluación del drenaje y del lavado de nitratos en un cultivo de tomate para industria en riego por goteo y acolchado plástico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 176 pp..

**CAPÍTULO 2.**  
COMPARACIÓN AGRONÓMICA Y PRODUCTIVA  
DE UN CULTIVO DE JUDÍA VERDE BAJO MALLA  
CON Y SIN NEBULIZACIÓN EN ÉPOCA  
PRIMAVERO-ESTIVAL

---





# 1. Introducción

## 1.1. Judía verde (*Phaseolus vulgaris* L.)

El origen de la judía lo podemos encontrar en el continente americano, más concretamente alrededor de Méjico, Perú, Ecuador y Bolivia. La judía verde (*Phaseolus vulgaris* L.) fue domesticada en las regiones altas de Latinoamérica hace más de 7000 años. La introducción en España y posteriormente su difusión al resto de Europa tiene lugar en las expediciones de comienzos del siglo XVI (INFLUVEC, 1970).

Han sido numerosos los trabajos relacionados con el estudio del cultivo de judía verde. Lucas y col. (1976), Robitaille (1978) y Geiger y Shieh (1988) entre otros, estudiaron el patrón de distribución de asimilados entre las diferentes partes de la planta de judía. La actividad de los órganos sumidero o potencia de sumidero fueron evaluadas por Borchet-Zampini y col. (1980), Sung y col. (1989), Binnie y Clifford (1999). En cuanto a bioproductividad, Peet y col. (1977), Geiger y col. (1989), Hao (1999), etc. estudiaron la tasa de crecimiento de las diferentes partes de la planta de judía. También se han llevado a cabo estudios de producción de judía verde en diferentes sistemas de cultivo: al aire libre (Roldán y col., 2001) o en invernaderos de plástico (Hernández y col., 2001; Escobar, 2004; Meca y Gázquez, 2004 y 2005; Hoyos y col., 2007; Meca y col., 2007; Hernández, 2009)

### 1.1.1. Morfología

El sistema radicular de la judía verde está constituido por una raíz principal y gran número de raíces secundarias. En cultivos tradicionales al aire libre, la raíz principal puede alcanzar de 1 a 1,5 m de profundidad, encontrándose mayor concentración de raíces en los primeros 30 cm

(Doorembos y Kassan, 1986).

El tallo es herbáceo, delgado y rígido una vez adquiere su posición final. En las judías de enrame alcanza una altura de 2 a 3 metros.

Las hojas son trifoliadas, con un peciolo largo que termina en tres folíolos grandes, más o menos triangulares, acabados en punta y de superficie ligeramente áspera y presentan unas pequeñas estípulas en la base del peciolo (Serrano, 1996). El tamaño es variable según la variedad.

Las flores pueden ser de varios colores si bien el color es único para cada variedad y en la mayoría de los casos es blanco. Su fecundación es autógama, con cierto riesgo de alogamia. Contienen 10 estambres y un ovario simple, dentro del cual se desarrolla una vaina, más o menos curvada, de sección, longitud y color variables.

Los frutos son vainas que contienen de 4 a 6 semillas. La forma (redonda, oval o plana), color, dimensiones y apegaminado, son características de cada variedad. La vaina puede alcanzar los 50 cm de longitud y los 4 cm de anchura.

Las semillas son granos sin albumen, su forma varía desde arriñonada a globosa, de dimensiones y colores variables.

## *1.1.2. Requerimientos edafológicos*

Para conocer el potencial productivo de un cultivo es necesario determinar los factores que intervienen en el proceso de crecimiento, como se relacionan entre sí y cómo actúan sobre el vegetal (Roberts y col., 1987). La judía es una planta de ambiente húmedo y temperaturas suaves; las mayores producciones se obtienen en los climas cálidos, y las mejores calidades se consiguen donde las temperaturas tienen pocas oscilaciones extremas (Serrano, 1979).

### *1.1.2.1. Temperatura*

Procesos como la fotosíntesis, la respiración, la germinación del polen y la formación de semillas presentan una elevada dependencia de la temperatura (Massaya y White, 1991). Las temperaturas críticas para judía verde en las distintas fases de desarrollo, se pueden ver en la tabla 1.

**Tabla 1.** Temperaturas críticas para judía verde en las distintas fases de desarrollo

Temperatura mínima de germinación	10 °C
Temperatura óptima del suelo para la germinación	15-20 °C
Temperatura máxima de germinación	25 °C
Temperatura mínima desarrollo del cultivo	10-15 °C
Temperatura óptima desarrollo del cultivo	20-25 °C
Temperatura máxima desarrollo del cultivo	30 °C
Temperatura mínima floración	10-15 °C
Temperatura óptima floración	15-25 °C
Temperatura máxima floración	30 °C
Temperatura mínima letal	-1 °C
Temperatura mínima biológica	0 °C
Temperatura máxima biológica	35 °C
Temperatura óptima por la noche para el desarrollo vegetativo	15-18 °C
Temperatura óptima durante el día para el desarrollo vegetativo	20-25 °C
Temperatura optima para la polinización	15-25 °C

Fuente: MARM, 2008

Algunos índices de crecimiento como la tasa de asimilación neta (NAR) o el área foliar específica (SLA) son afectados por la temperatura, y existe un efecto a largo plazo de aclimatación del metabolismo al régimen térmico (Loveys y col., 2002).

Se ha observado que se producen incrementos de longitud de vaina para mayor potencial hídrico y regímenes de temperaturas más bajos. Por encima de los 30°C aparecen deformaciones en las vainas y se produce el aborto de flores (Serrano, 1996; Maroto, 2002).

### 1.1.2.2. Humedad

La judía es una planta que necesita bastante humedad en el ambiente que la rodea. Es muy importante que el porcentaje de humedad se mantenga estable, sin que sufra grandes fluctuaciones

(Serrano, 1996). La humedad relativa óptima del aire para la germinación y primeras fases del cultivo es del 60% al 65% y posteriormente oscila entre el 65% y el 70% (MARM, 2008). Ambientes de baja humedad relativa unidos a altas temperaturas conducen a un desequilibrio hídrico ya que la planta transpira más agua de la que puede absorber por el sistema radicular.

### *1.1.2.3. Radiación*

Massaya y White (1991) señalaron que aunque existen algunos cultivares de judía indiferentes al fotoperiodo, la mayoría son de día corto. En general se considera que las variedades precoces no responden a la duración del fotoperiodo, y las tardías sí (Maroto, 2002). Las variedades actuales son más exigentes en ciclos de días largos. Por otra parte, las variedades de enrame son más exigentes en luminosidad que las de porte bajo, principalmente durante el crecimiento.

### *1.1.2.4. Suelo*

Los suelos más indicados para el cultivo de judía son ligeros o medios (Maroto, 2002), bien drenados y de textura silíceo-arcillosa o areno-limosa (Serrano, 1979). La temperatura del suelo para que la planta se encuentre en las mejores condiciones debe oscilar entre los 15°C y los 20°C con pH entre 5,5 y 7,5 (Serrano, 1990).

## *1.1.3. Material vegetal*

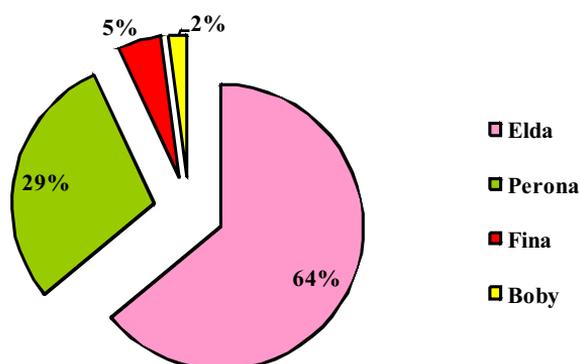
La diversidad varietal de las judías es muy amplia y existen varias clasificaciones entre las cuales la más común es la de judías de mata baja o enanas (*P. Vulgaris* ssp. *nanus*) y judías de mata alta o de enrame (*P.Vulgaris* ssp. *volubilis*). En ambos casos el aspecto de vaina puede ser: verde plana, verde redonda y amarilla redonda. En España, según la empresa nacional MERCASA (2008), las variedades que absorben gran parte del mercado (figura 1 ) son:

**Elda:** Vainas aplanadas y de muy buena producción, ancha y de menos longitud que la perona, tiernas y sin hebras.

**Perona:** Planta de enrame y de porte indeterminado. Sus frutos son de gran tamaño, sección aplanada y sin hilos. Existen principalmente tres tipos, las verdes largas, las verdes semilargas y las verdes con tonos o pintas de color rojo. Su producción se consume mayoritariamente en fresco.

**Boby:** Vainas tubulares (cilíndricas), menos tamaño que las anteriores, gruesa y carnosa.

**Rastra o Herradura:** Vaina aplanada y semicurvada en herradura, tamaño irregular, superfina, muy tierna y puede presentar hebras.



**Figura 1.** Porcentaje de ventas sobre total anual de las principales variedades de judía verde (MERCASA, 2008)

#### 1.1.4. Mejora genética

Es necesaria una mejora genética con objeto de desarrollar de forma continua nuevas variedades con buena producción y calidad y que se adapten a las zonas específicas de cultivo con resistencias a las plagas y enfermedades predominantes en ellas. La introducción, selección masal y retrocruzamiento son las técnicas más utilizadas en la mejora genética de la judía de verdeo. Los estudios se realizan fundamentalmente por empresas privadas, razón por la cual existen muy pocos datos publicados (Escobar, 2004).

### 1.1.5. Agronomía del cultivo

La preparación del terreno es de vital importancia pues su objetivo es la obtención de unas condiciones óptimas para el desarrollo de las raíces durante todo el ciclo de cultivo así como acondicionar la superficie del terreno para la siembra.

La optimización de la densidad de plantación a las características de las variedades y a las condiciones de clima y suelo bajo las que se desarrolla el cultivo, constituye un objetivo muy importante. El espaciamiento entre plantas, en general, enmarca una relación directa con la radiación interceptada y por tanto, con el rendimiento, el número de vainas, el número de semillas por vaina y el peso de las semillas. Los cultivares de ciclo corto, precoces y de porte bajo requieren densidades de siembra más elevadas.

La siembra de judía verde se puede realizar en llano o en surcos (Maroto, 2002) y el método más usado es en línea y a golpes (López Gálvez, 1990).

La recolección manual es obligada para incrementar la calidad al no dañar el fruto. El gran problema de la recolección manual de la judía es que llega a alcanzar el 50% del coste total del cultivo (Maroto, 2002). Según Hoyos y col. (2007), la calidad en la judía esta muy ligada a la recolección, que debe ser realizada cuando apenas sea perceptible la semilla en la vaina, y ésta alcance el máximo desarrollo posible, objetivo que hace necesario realizar recolecciones con muy pocos días entre ellas, principalmente cuando las condiciones de luz y temperatura van siendo favorables para el desarrollo del fruto.

La judía es muy exigente en riegos en lo que se refiere a la frecuencia y volumen que van a depender del estado fenológico de la planta, así como del ambiente en que ésta se desarrolla (tipo de suelo, condiciones climáticas, calidad del agua de riego, etc.).

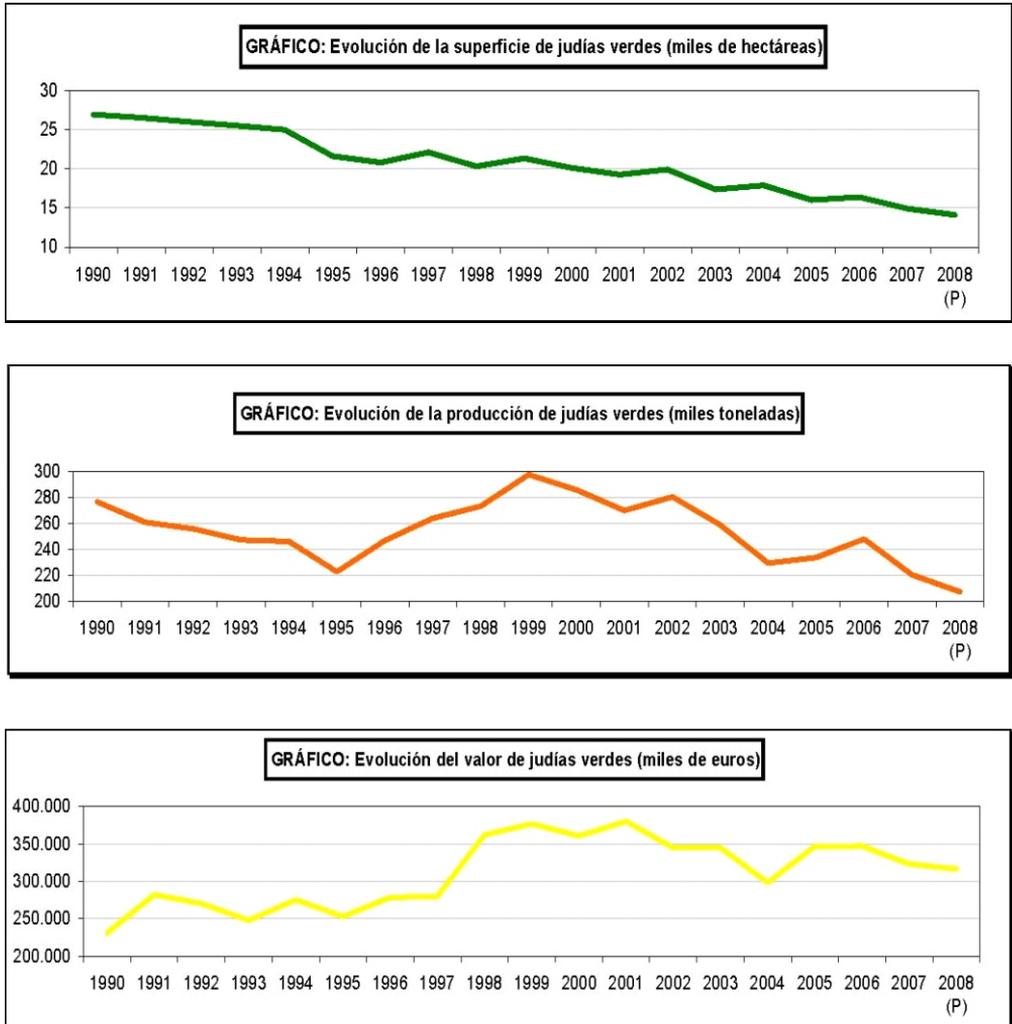
Casas (1999) presenta como solución nutritiva a aportar, las siguientes cifras:

Ca(NO <sub>3</sub> )	722 g·m <sup>-3</sup>	
HNO <sub>3</sub>	102 g·m <sup>-3</sup>	123 ml·m <sup>-3</sup> (60%)
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	147 g·m <sup>-3</sup>	124 ml·m <sup>-3</sup> (75%)
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	40 g·m <sup>-3</sup>	
KNO <sub>3</sub>	643 g·m <sup>-3</sup>	

### 1.1.6. Superficie, producción y valor de la judía verde al aire libre y bajo abrigo

El 36% de la superficie total dedicada al cultivo de la judía verde en España se produce bajo abrigo y el 60% al aire libre (Anuario de Estadística Agroalimentario del MARM, 2007). Granada, Almería y Málaga, son las provincias con más producción en España, con un porcentaje de superficie cultivada protegida con invernaderos del 77%, 97% y 81% respectivamente. Por otro lado, la provincia con más producción de judía verde al aire libre es Granada, con un 23% de superficie cultivada. Los rendimientos medios en España para los diferentes sistemas de cultivo (campaña 2006-2007) fueron: aire libre (secano: 3.826 Kg/ha, regadío: 13.959 Kg/ha) e invernadero, 17.493 Kg/ha.

En los siguientes gráficos (figura 2) se muestra la evolución de la superficie, producción y valor de la judía verde durante los años 1990 al 2008. Tanto la superficie como la producción de judía verde han sufrido un descenso importante. Según el Anuario de Estadística Agroalimentario del MARM, en España, el año con mayor superficie cultivada de judía verde es 1990, con 26.900 hectáreas, disminuyendo un 50% aproximadamente en 2008 (14.100 hectáreas). En cuanto a la producción de judía verde, ésta ha sufrido numerosos cambios, pasando de 297.500 toneladas en 1999, a 207.100 toneladas en 2008. Estas cifras anuales nos indican la disminución progresiva del cultivo de judía verde en España. Esto se debe a la competencia del mercado exterior, a la reducción cada vez mayor de los plaguicidas autorizados y, en mayor medida, al elevado coste que supone la mano de obra que requiere este cultivo, tanto en el entutorado de la planta como en su recolección; otra importante razón sería su alta sensibilidad a la salinidad que la hace muy vulnerable y difícil de mantener cuando se emplean aguas de muy baja calidad, sobre todo, en zonas mediterráneas donde se sigue concentrando una gran parte de su cultivo (Hoyos y col., 2007). En Almería, la judía a pesar de haber experimentado un incremento medio de su precio del 4,3%, ha disminuido el valor de su producción en un 24,7% en la campaña 2008-2009, debido al retroceso de este cultivo en superficie y producción (Fundación Cajamar, 2009). El precio del cultivo de judía verde alcanza su máximo valor en 2001 (380.100 euros) en cuanto al periodo 1990-2008. El precio medio semanal de la judía verde plana, a lo largo de la campaña 2009 se ha mantenido estable en las posiciones de origen, mercado y destino, con incrementos del 4% y 8% en origen y mercado y una disminución del 8% en destino (MARM, 2009).



Fuente: MARM, 2009

**Figura 2.** Evolución de la superficie, producción y valor de la judía verde en España durante los años 1990 al 2008

### 1.1.7. Valor nutricional

La judía es una leguminosa con grandes posibilidades para la alimentación humana, por su doble aprovechamiento (de grano y de vaina) y por su aporte proteico. Es un alimento ideal para dietas porque su valor energético es muy bajo, debido a su reducido contenido en hidratos de carbono y a su elevado porcentaje en agua. Su contenido en micronutrientes se sitúa en los valores del grupo de hortalizas. Es rica en fibra, vitaminas y minerales. Destaca su alto contenido en calcio, potasio y ácido ascórbico, como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Valor nutricional de 100 g de Judía verde

Valor energético .....	32 Kcal		
• Agua .....	90,1 %	• Hierro .....	0,8 mg
• Proteínas .....	1,9 g	• Sodio .....	7 mg
• Grasas .....	0,2 g	• Potasio .....	132 mg
• Hidratos de carbono .....	7,1 g	• Vitamina A .....	600 UI
• Fibra .....	1 g	• Tiamina .....	0,08 mg
• Cenizas .....	0,7 g	• Riboflavina .....	0,11 mg
• Calcio .....	56 mg	• Niacina .....	0,5 mg
• Fósforo .....	4,4 mg	• Ácido ascórbico .....	19 mg

(Watt y col., 1975, citado por Maroto, 2002)

### 1.1.8. Deficiencias y toxicidad

Una característica típica de las plantas que crecen bajo un déficit de nutrientes es la alta retención en las raíces y los bajos porcentajes de traslocación a los brotes. Según Bennett (1983) citado por Escobar (2004), las principales deficiencias de macro y micronutrientes y sus causas en la judía, son: *Nitrógeno*: causada por excesos de riego o fuertes lluvias, que provocan lixiviación de nitratos o bien por supresión de la bacteria fijadora; *Fósforo*: en suelos con bajo pH o elevada

lixiviación; *Potasio*: en poca fertilidad, alto contenido en Ca y Mg, bajo pH, alta permeabilidad o bajo contenido en arcilla; *Calcio*: en suelos ácidos con pH de 4 a 5,5 se reduce el nivel de Ca y Mg. La máxima disponibilidad de Ca se da con valor de pH en suelo entre 7 y 8,5; *Magnesio*: en suelos ácidos con bajo nivel de bases y sobre todo en suelos con bajos niveles de K y Ca. La disponibilidad de Mg se reduce con pH menor de 6,5; *Azufre*: su déficit rara vez aparece en judía. Su disponibilidad se reduce con pH menor a 6; *Hierro*: en suelos calcáreos con carbonato cálcico libre, suelos con alto nivel de P ó suelos ácidos desencalados. Su disponibilidad es baja con pH mayor de 6; *Zinc*: produce un retraso en la maduración de las vainas; y *Boro*: las hojas más jóvenes o las yemas son las más afectadas.

Por otro lado, los principales elementos que pueden producir toxicidad en judía según Bennett (1983) citado por Escobar (2004) son: *Aluminio*: la toxicidad se hace evidente para pH menor de 6, con portes enanos y desarrollos radiculares empobrecidos y con gran número de raíces adventicias superficiales; *Manganeso*: en suelos con pH bajo, mal drenaje, etc., se ha observado toxicidad para  $112 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de suelo y para  $1640 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de tejido de planta (Fageria, 2001); *Boro*: aparece cuando la aplicación del fertilizante no es uniforme, o bien si ha sido demasiado cercana a las semillas. No obstante, la judía es bastante tolerante al riego con agua con cierto contenido de boro ( $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) (Banuelos y col., 2002); *Sodio y Salinidad*: la judía es muy sensible a la salinidad (Banuelos y col., 2002) y/o concentración de Na en suelo para un porcentaje de saturación superior al 4%; *Cobre*: se observa toxicidad en judía para niveles de  $37 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de suelo y para  $10 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de tejido de planta (Fageria, 2001).

### 1.1.9. Plagas y enfermedades

Las principales plagas de la judía verde son: Araña Roja (*Tetranychus urticae*), Mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*), Pulgón (*Aphis rumicis* y *Aphis fabae*), Trips (*Frankliniella occidentalis*), Minador de hoja (*Liriomyza trifolii*) y Nemátodos (*Meloidogyne spp.*).

Las principales enfermedades de la judía verde son:

- Hongos: Oidio o “ceniza” (*Erysiphe spp.*), Botritis o podredumbre gris (*Botrytis cinerea*), Sclerotinia o podredumbre blanca (*Sclerotinia sclerotiorum*), Podredumbre de cuello y/o raíces (*Phytophthora spp.* y *Pythium sp.*), Enfermedad del cuello de raíz (*Rhizoctonia solani*), Fusarium solani f. Sp. Phaseoli y Roya común de la judía (*Uromyces phaseoli*).

de la judía (*Pseudomonas syringae* pv. *Phaseolicola*).

- Virus: CMV (*virus del mosaico del pepino*), TSWV (*virus del bronceado del tomate*), TYLCV (*virus del rizado amarillo del tomate*), BYMV (*virus del mosaico amarillo de la judía*) y BCMV (*virus del mosaico común de la judía*).

## 1.2. El cultivo protegido de judía verde

Según datos del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM, 2008), el invernadero genera un ambiente propicio para el cultivo de judía verde ya que consigue la obtención de productos fuera de época con mayor precocidad, pues se dota a la planta del clima óptimo que reduce su ciclo vegetativo y que repercute en una mejor cotización de los frutos y un incremento de las producciones y de la calidad de los frutos; ello se consigue con el uso de técnicas tales como la fertirrigación, por la utilización de variedades selectas y porque los frutos no están sometidos directamente a los efectos de los factores meteorológicos. Como inconvenientes podemos citar, una elevada inversión económica y gastos del cultivo y un incremento de enfermedades aéreas y del suelo en zonas con alta intensidad de este cultivo, que exigen mayor número de tratamientos. Este cultivo no se ha extendido tanto como otros en invernadero ya que se necesita una excesiva mano de obra para su recogida y es muy sensible a la salinidad del suelo y del agua, así como a las enfermedades que producen pudrición, típicas de invernadero. Debido a su adaptación a cualquier rotación de cultivos y su utilización en sustitución de otros cultivos por su rápido desarrollo, hay siembras, arranques y recolecciones de judía verde en invernadero en todas las épocas, aunque las mayores densidades de cultivo y producción se dan en primavera (MARM, 2008).

El marco más frecuente en invernadero es de 2 m x 0,5 m, con 2-3 semillas por golpe, e incluso con una semilla por golpe. Al aire libre la distancia entre líneas es de 0,7-0,8 m para la judía de enrame, con 3-5 semillas por golpe.

El sistema de entutorado repercute directamente en la producción. Es una práctica imprescindible en la judía de enrame para permitir el crecimiento vertical y la formación de una pared de vegetación homogénea. El sistema más tradicional consiste en la colocación de un hilo de rafia por golpe que se sujeta por un extremo al tallo y por el otro al emparillado del invernadero. Existen otros sistemas de entutorado (en Y, L o parra), siendo los sistemas en Y y en L los que mejores

resultados alcanzan respecto al de parra (Roldán y col., 2004).

La duración del ciclo de cultivo de judía de enrame bajo invernadero es de 110 (época estival) a 150 días (época invernal). Desde que se siembra hasta que se inicia la recolección transcurren de 65 a 95 días. Desde que se inicia la recolección hasta que finaliza el cultivo median de 60 a 90 días (Maroto, 2002).

La producción de judías de mata baja en invernadero, en el área mediterránea, varía entre 2 y 3 kg·m<sup>-2</sup> en épocas de climatología óptima, y alrededor de 1 kg·m<sup>-2</sup> en los cultivos de otoño-invierno sin calefacción. Para las variedades de enrame, la producción puede ser de 1,5 kg·m<sup>-2</sup> en condiciones desfavorables (días cortos y fríos) y llegar incluso a 6 kg·m<sup>-2</sup> en días largos, temperaturas favorables y ciclos de 90 días de recolección (Escobar, 2004). Meca y Gázquez (2004 y 2005) realizaron ensayos de diferentes cultivares de judía verde de enrame bajo un invernadero de plástico “parral a dos aguas”, obteniendo mayor productividad total (3,4 kg·m<sup>-2</sup>) y comercial (2,9 kg·m<sup>-2</sup>) y mejor respuesta en el periodo invernal con el cultivar “Donna” y en primavera con el cultivar “Estefanía” (producción total, 5,0 kg·m<sup>-2</sup> y producción comercial, 4,2 kg·m<sup>-2</sup>). Hoyos y col. (2007) estudiaron la influencia de la cadencia de recolección en la producción y calidad de judía verde de enrame bajo invernadero de plástico, concluyendo que, habría que renunciar a tener más producción para preservar la calidad y por tanto, reducir el tiempo entre recolecciones.

La intensidad de la radiación solar que penetra en el invernadero es un parámetro importante que influye no sólo en el clima interior sino también en la productividad del invernadero (Baille y Tchamitchian, 1993). Hernández y col. (2001) encontraron mayores producciones de judía verde bajo invernadero de alta pendiente debido a la mayor transmisividad del mismo, respecto a otro de baja pendiente. Hernández (2009), no encontró diferencias en cuanto a producción comercial de judía verde de mata baja en primavera, entre dos tipos de invernadero (parral y multitúnel). Escobar (2004), estudió el efecto del empleo de acolchados plásticos blancos en judía verde de mata baja, en invernadero plástico, concluyendo que el uso de acolchados con plásticos reflectantes colocados sobre el sistema enarenado no mejoraron ni el crecimiento ni la productividad del cultivo. Las condiciones edafoclimáticas de un invernadero de malla son aptas para el crecimiento y desarrollo de diferentes cultivos hortícolas. Un aspecto muy importante, desde el punto de vista de la optimización del uso de recursos, es el aumento en la eficiencia en el uso de agua por los cultivos bajo malla. La reducción de la radiación en invernaderos, provoca un descenso significativo de la evapotranspiración (Medrano, 2005) y por tanto, de las necesidades de riego respecto al aire libre (Romero-Gómez y col., 2008). Dentro del invernadero, sobre todo con marcos

densos y vegetación exuberante, hay que tener especial cuidado con el suministro de agua pues existe un gran riesgo de caída de flores y de ataques criptogámicos que pueden disminuir o anular la cosecha de judía verde (Serrano, 1996). Si el drenaje no es bueno, basta con un riego excesivo para dañar la planta, quedando de color pajiza y achaparrada (Serrano, 1990).

Por otro lado, un aspecto muy favorable del cultivo de judía verde en un recinto cerrado frente al cultivo al aire libre, es que permite la utilización de sistemas de lucha integrada con suelta de depredadores naturales y el empleo de sustancias naturales de prevención limitándose así el control químico. Meca y col. (2007), evaluaron, en un ciclo de primavera, la productividad y calidad de cultivares de judía de mata baja en invernadero de plástico tipo “parral de raspa y amagado” bajo control integrado aplicando una estrategia reducida de suelta de insectos auxiliares, obteniendo producciones totales y comerciales de  $1,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $1,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectivamente.

Para restringir las plagas de la judía verde se emplean controles preventivos (desinfección de estructuras y suelo previa a la plantación, eliminación de malas hierbas y restos de cultivos, vigilancia de los cultivos durante las primeras fases del desarrollo, colocación de mallas en las bandas de los invernaderos, no asociar cultivos en el mismo invernadero, no abandonar los brotes al final del ciclo, colocación de trampas cromáticas amarillas y azules, etc.), controles biológicos (para araña roja: *Amblyseius californicus*, *Phytoseiulus persimilis*, *Feltiella acarisuga*; para mosca blanca: *Trialeurodes vaporariorum*, *Bemisia tabaci*; para pulgón: *Aphidoletes aphidimyza*, *Aphidius matricariae*, *Aphidius colemani*, *Lysiphlebus testaceipes*, *Aphidius colemani*; para trips: *Amblyseius barkeri*, *Aeolothrips sp.*, *Orius spp.*; para minador de hoja: *Diglyphus isaea*, *Diglyphus minoensis*, *Diglyphus crassinervis*, *Chrysonotomyia formosa*, *Hemiptarsenus zihalisebessi*, *Diglyphus isaea*; para nemátodos: *Arthrobotrys irregularis*), controles físicos (esterilización con vapor y solarización, para nemátodos) y controles químicos (insecticidas y acaricidas asignados a cada plaga: Acrinatrin 15%, Aceite de verano 75%, Imidacloprid 20%, etc.).

Para controlar las enfermedades del cultivo de judía verde protegido, se llevan a cabo también medidas preventivas como: eliminación de malas hierbas y restos de cultivo, utilización de plántulas sanas, emplear marcos de plantación adecuados que permitan la aireación, manejo adecuado de la ventilación y el riego, solarización, destruir plantas enfermas, etc., y controles químicos mediante la aplicación de insecticidas y fungicidas asignados para cada enfermedad (Azufre micronizado, mojable o molido, Triadimenol, Captan, etc.).

## 2. Objetivo

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de un sistema de nebulización de baja presión sobre el crecimiento, desarrollo y producción de un cultivo de judía verde bajo malla, además de cuantificar el consumo de agua de riego y del sistema de nebulización y el efecto que la malla provoca en dicho consumo. Se ha comparado una estructura cubierta de malla y provista de nebulización de baja presión (MN) con una estructura de malla sin nebulización (M) y con cultivo al aire libre (AL), para producción de judía verde de enrame.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Localización

El estudio se desarrolló en el Centro IFAPA Camino de Purchil, en cuyas instalaciones se construyó el invernadero de malla y se diseñó la estructura de la parcela al aire libre. Estas instalaciones están ubicadas en la Vega de Granada, dentro del término municipal de Granada (Latitud: 37° 10' 21"N; Longitud: 3° 38' 10"O; Altitud: 600 m).

### 3.2. Estructura del invernadero de malla y parcela al aire libre

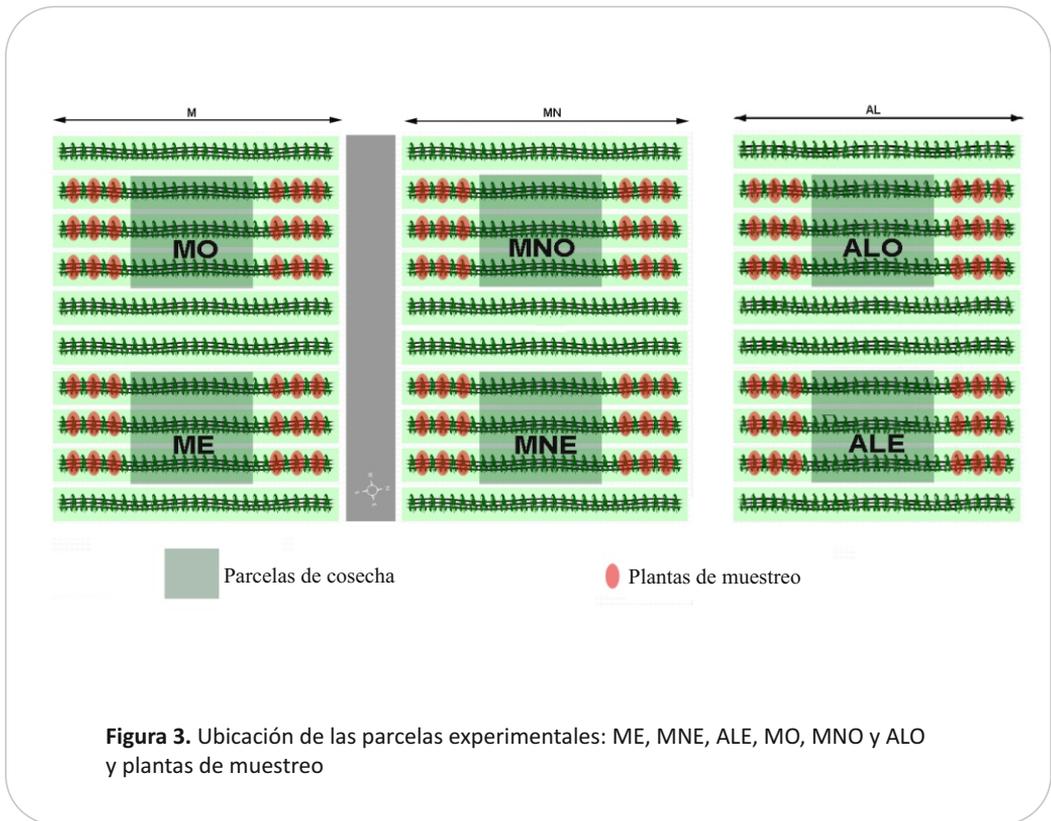
La estructura del invernadero de malla y de las parcela al aire libre se ha descrito en el apartado 3.2 del capítulo anterior.

Los tratamientos bajo malla y al aire libre disponían de una superficie útil cultivada de 336 m<sup>2</sup>. El entutorado del cultivo se realizó con cintas de rafia de polietileno colocado a una altura de 2 m, permitiendo su crecimiento vertical, de modo que aproveche mejor la luz y se favorezca la ventilación.

### 3.3. Tratamientos y diseño estadístico

Para el estudio estadístico de los datos se realizó un análisis de varianza y se utilizó el test de la mínima diferencia significativa (MSD). El diseño estadístico utilizado para cada año ha sido multifactorial con factores anidados y tres repeticiones, siguiendo la metodología descrita por Júdez (1991). El factor principal es el sistema de cultivo bajo malla (M), bajo malla con nebulización (MN) y testigo aire libre (AL) y el factor anidado es el sector este (E) u oeste (O) dentro de cada sistema. Se establecieron por tanto, 6 tratamientos: ME, MNE, ALE, MO, MNO y ALO, con 3 repeticiones en cada

uno (figura 3). El factor año se ha tomado como una fuente de variación cruzada con los sistemas de cultivo. El test discriminador de medias utilizado es el de la mínima diferencia significativa (Gómez y Gómez, 1984).



### 3.4. Agronomía del cultivo

Previamente a la siembra, se realizó un pase con subsolador, otro con cultivador y otro con rotavator, tanto en el invernadero como al aire libre. Posteriormente, se extendieron los goteros y se cubrió el suelo con rafia negra, abriendo los orificios necesarios para disponer los golpes de siembra.

### 3.4.1. Material vegetal

Se realizó un estudio preliminar con judía verde de enrame, testando las variedades *Festival* y *Kylie* en el ciclo de primavera-verano de 2007. La variedad *Kylie* tuvo graves problemas de cuajado en gancho por la amplia oscilación térmica día-noche y fue muy sensible a enfermedades fúngicas por el uso de nebulización. Además un ataque intenso de araña roja provocó daños irreversibles en las hojas, y los enemigos naturales no fueron efectivos.

La variedad elegida finalmente fue "*Festival*". Se trata de una variedad de judía tipo Perona larga (22-24 cm), caracterizada por su buena adaptación a plantaciones de otoño y primavera con un largo periodo de recolección. La vaina es muy uniforme, de color brillante y exenta de hebra, presentando un fruto de gran turgencia.

Se realizó siembra en mesetas, en líneas pareadas, separadas entre sí 1,5 m. Se sembraron cuatro plantas por golpe en líneas de cultivo norte-sur. La distancia entre golpes fue de 0,10 m. Se sembró a la par un 5% en semillero para posibles fallos de nascencia y marras. La densidad de plantación fue de  $21,33 \text{ pl}\cdot\text{m}^{-2}$ , entutorando a 2 m de altura.

El estudio se realizó en ciclo de primavera-verano durante los años 2008 y 2009. La siembra tuvo lugar en la primera semana de Mayo. La nascencia se produjo a los diez días de la siembra, aproximadamente.

### 3.4.2. Características del suelo

El suelo del área experimental se clasifica como Typic Xerofluent (Soil Survey Staff, 1992) con una densidad aparente de  $1,43 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Este suelo es característico de llanuras aluviales muy permeables, muy calcáreas, y con materia orgánica moderada en las capas inferiores.

Se tomaron tres muestras en el invernadero y tres muestras al aire libre y se realizó una muestra compuesta en cada caso. De esas muestras, se realizó el análisis de suelo (tabla 3) según la metodología descrita por el Método Oficial de Análisis del MAPA (1994), de cada tratamiento a inicios del ciclo 2008 a 30 cm de profundidad.

**Tabla 3.** Analítica del suelo a 30 cm de profundidad

	<b>INVERNADERO</b>	<b>AIRE LIBRE</b>
Caliza Activa (%)	3,30	3,30
Carbonatos (%)	9,60	10,30
Clasificación	franco	franco
Fósforo asimilable (ppm)	16	11
Materia orgánica oxidable (%)	0,82	0,83
Nitrógeno total (%)	0,80	0,09
pH	8,7	8,6
Potasio asimilable (ppm)	140	112
Prueba previa salinidad (mmhos/cm)	0,16	0,15
Textura arcilla (%)	13,00	13,05
Textura arena (%)	43,80	43,75
Textura limo (%)	43,20	43,20

### 3.4.3. Características del agua

El agua que se empleó para el riego de los cultivos al aire libre y en invernadero y para el sistema de nebulización es bombeada de un pozo situado en la zona de estudio. Se analizaron muestras de agua y los análisis fueron realizados según la metodología descrita por el Método Oficial de Análisis del MAPA (1994). Las características fisicoquímicas del agua de riego se dan en la tabla 4. El agua se clasifica como C3-S1 (Cuenca, 1989).

**Tabla 4.** Características fisicoquímicas del agua de riego recogida a inicios del ciclo 2008

<b>NOMBRE DETERMINACION</b>	<b>RESULTADOS</b>
Dureza	522 mg(carbonato calcico)/l
Bicarbonatos	434 mg/l
Boro	<0,2 mg/l
Calcio	120 mg/l
Carbonatos	<3 mg/l
Cloruros	23 mg/l
Nitratos	41 mg/l
Magnesio	54 mg/l
Potasio	4,6 mg/l
Sodio	22 mg/l
Sulfatos	171 mg/l
Conductividad	855 $\mu$ S/cm
pH (a 20°C)	7,7
Índice de R.A.S	0,4

#### 3.4.4. Riego

El riego en todos los tratamientos fue por goteo automatizado, con emisores en línea. Se instalaron dos ramales portagoteros en cada línea de cultivo a una distancia de 0,15 m, con emisores en línea de 3 L·h<sup>-1</sup> cada 0,25 m (5,33 emisores·m<sup>-2</sup>). La presión de trabajo fue de 1,8 atm. La programación del riego se hizo mediante sensores de humedad (ECH2O EC-5, Decagon devices) manteniendo valores entre 20-30% de cantidad volumétrica de agua en la zona radicular, permitiendo un agotamiento de agua del suelo del 30% como criterio de riego (Cuenca, 1989). Al

final de cada ciclo de cultivo se calculó la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA,  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) en función de la producción comercial obtenida ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y de la cantidad de agua aportada por el riego y el sistema de nebulización ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ) en su caso.

### 3.4.5. Abonado

Las dosis de fertilizante aplicadas se calcularon según las características de cada fórmula comercial, las aportaciones del agua de riego y las necesidades del cultivo (Casas,1999). En la tabla 5 se indica el cálculo de la solución nutritiva de judía verde.

El fertirriego se realizó mediante un equipo automatizado controlado por un programador de riego, con capacidad de ajustar el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, así como la proporción de los distintos abonos, según los valores preestablecidos.

El programa de fertirrigación comenzó a los 15 días después de la siembra en ambos ciclos y en todos los tratamientos.

**Tabla 5.** Cálculo de la solución nutritiva propuesta para judía verde

	$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$							$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	
	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{H}_2\text{PO}_4$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3\text{H}^+$	$\text{Na}^+$
Agua	0,66			0,12	3,00	2,20	1,78	0,11	0,04
Solución propuesta	12,00	0,50	1,50	3,00	3,50	1,13	1,13		
Diferencia	11,34	0,50	1,50	2,88	0,50				
6,96 $\text{NO}_3\text{H}$	6,96								
0,50 $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$	1,00				0,50				
2,88 $\text{NO}_3\text{K}$	2,88			2,88					
1,50 $\text{PO}_4\text{H}_3$			1,50						
0,50 $\text{NO}_3\text{NH}_4$	0,50	0,50							

El abonado se programó para una conductividad calculada de  $0,8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  y pH 6,5.

### 3.4.6. Tratamientos fitosanitarios y control integrado

Dentro del invernadero se llevó a cabo lucha integrada con trampas y suelta de enemigos naturales. Al aire libre, se realizó un control de plagas convencional, con tratamientos preventivos y curativos a lo largo de los ciclos.

Los tratamientos fitosanitarios aplicados en el cultivo bajo malla, compatibles con la producción integrada de judía verde, fueron:

- Fungicidas: Azufre mojable 80%, Azufre micronizado.
- Insecticidas: Abamectina 1,8%, Pirimicarb 50%, Piretrinas 4%, Flufenoxuron 10%, Spiromesifen 24%.

Los tratamientos fitosanitarios aplicados en el cultivo al aire libre, fueron:

- Fungicidas: Azufre mojable 80%, Propamocarb 60,5%, Azufre micronizado, Metil tiofanato 70%, Triadimenol 25%.
- Insecticidas: Clorpirifos 48%, Abamectina 1,8%, Imidacloprid 20%, Cipermetrina 10%, Clorpirifos 5%, Pirimicarb 50%, Oxamilo 10%, Piretrinas 4%.

Las cantidades aplicadas de cada producto se detallan por tratamiento y ciclo en el siguiente capítulo.

Las principales plagas detectadas en el cultivo de judía verde, han sido: gusano de alambre (*Agrotis lineatus*), pulgón (*Aphis rumicis* y *Aphis fabae*), trips (*Frankliniella occidentalis*), mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) y araña roja (*Tetranychus urticae*).

Para eliminar la plaga del gusano de alambre, se colocaron bajo el suelo en los tres tratamientos cebos de patata, maíz y judías impregnadas con piretrina. Se colocaron trampas cromáticas amarillas (para pulgón y mosca blanca) y azules (para trips) en las bandas del invernadero y junto a las puertas y se eliminaron malas hierbas en el perímetro exterior del invernadero como medida preventiva ante el ataque de estas plagas.

Los enemigos naturales empleados para combatir la reproducción de pulgón, trips, mosca blanca y araña roja bajo la malla han sido: *Amblyseius swirskii*, *Phytoseiulus persimilis*, *Amblyseius californicus* y *Orius laevigatus*. Los tratamientos y sueltas de enemigos naturales se llevaron a cabo en función de los diagnósticos que se realizaban cada 10 ó 15 días aproximadamente. Como control

en producción integrada, además de los anteriores tratamientos, se aplicaron sustancias naturales como algas, aceites y jabón.

### 3.5. Análisis de producción

La producción total y comercial de los 6 tratamientos (ME, MNE, ALE, MO, MNO y ALO) en las parcelas de cosecha se evaluó cuantitativamente (figura 3). Los frutos fueron cosechados manualmente, pesados en fresco y contados, clasificados por calidades: frutos comerciales (judía recta, sin marca de grano, sin deformaciones exteriores visibles y con 20 cm aproximadamente de longitud), frutos no comerciales (vainas deformadas, en gancho, manchadas y con grano muy marcado). Las recolecciones se realizaban cada 3 ó 4 días. Para el análisis de los resultados, se han agrupado las producciones por semanas, dado que cada recolección está influenciada por la anterior y el estudio independiente de cada una de ellas presentaría muchas oscilaciones.

### 3.6. Análisis de crecimiento

El estudio de crecimiento de las plantas de judía verde en los sistemas de cultivo M, MN y AL se realizó a partir de los 22 d.d.s. en el ciclo 2008 y de los 26 d.d.s. en el ciclo 2009. Para realizar el análisis de crecimiento se tomaron periódicamente (cada 10-15 días) golpes completos de cada tratamiento que no presentaran efecto borde por pasillos adyacentes (figura 3). Las plantas se arrancaron con raíz, y se llevaron inmediatamente al laboratorio para proceder a su estudio.

En laboratorio, se determinaron los siguientes parámetros por planta:

- Peso fresco total de la parte aérea (g)
- Longitud del tallo principal (cm)
- Número de hojas
- Peso fresco y seco hojas (g)
- Peso fresco y seco tallos (g)
- Peso fresco y seco frutos (g)
- Superficie foliar (cm<sup>2</sup>)

Para obtener el peso seco de hojas, tallos y frutos (g), se secaron las muestras en una estufa de aire forzado 65 °C hasta alcanzar peso constante. La superficie foliar (cm<sup>2</sup>) se determinó mediante un medidor de área foliar (LI-3100, Li-Cor Inc.).

Para el tratamiento de datos se utilizó el diseño estadístico descrito en el apartado 3.3. En

base a los datos obtenidos en los muestreos se calcularon los siguientes índices de crecimiento.

- Índice de Área Foliar (LAI: Leaf Area Index,  $m^2 \cdot m^{-2}$ )

Se define como la distribución del dosel vegetal en el espacio de suelo que ocupa.

$$LAI = \frac{\text{área foliar}}{\text{área del terreno}}$$

Ecuación 1

- Área Foliar Específica (SLA: Specific Leaf Area,  $m^2 \cdot Kg^{-1}$ )

Índice morfológico que da una medida del grosor de las hojas en función de su peso.

$$SLA = \frac{\text{superficie foliar}}{\text{peso seco hojas}}$$

Ecuación 2

- Biomasa (CDW: Crop Dry Weight,  $Kg \cdot m^{-2}$ )

Refleja la producción de materia seca del cultivo por unidad de superficie.

$$CDW = \frac{\text{peso seco planta}}{\text{densidad de plantación}}$$

Ecuación 3

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Análisis de producción

Las recolecciones en ambos ciclos se iniciaron aproximadamente 60 días después de la siembra. En el ciclo 2008, la cosecha finalizó el 22 de agosto en el sistema de cultivo al aire libre y el 15 de octubre en los sistemas de cultivo bajo malla (109 y 164 días después de la siembra, respectivamente). En el ciclo 2009, en todos los sistemas de cultivo la cosecha finalizó el 18 de septiembre (135 días después de la siembra).

Durante el ciclo 2008 el sistema de cultivo AL finalizó a los 109 días de siembra. La comparación, por tanto, entre los tres sistemas de cultivo y los seis tratamientos se realizará únicamente hasta esa fecha, mientras que en el análisis estadístico de los sistemas y tratamientos bajo malla se utilizarán datos hasta 164 d.d.s.

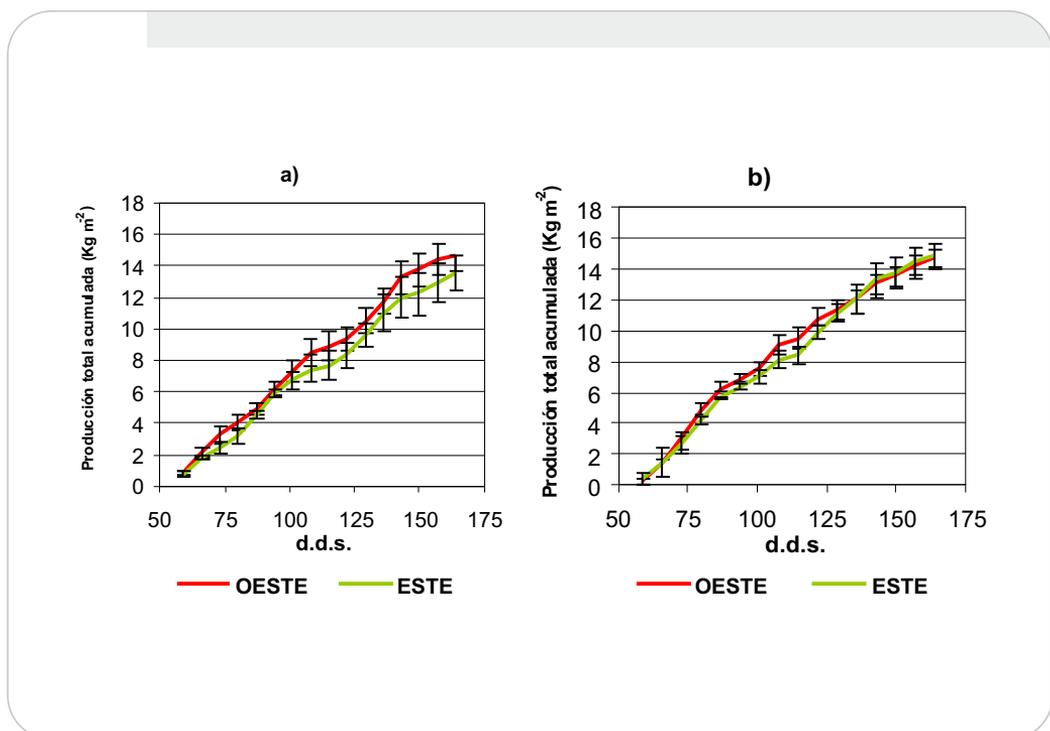
#### *4.1.1. Producción total y comercial acumulada por orientaciones*

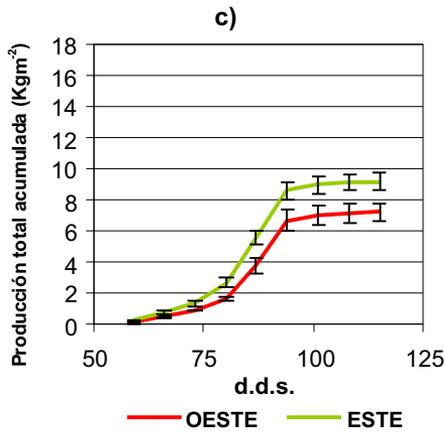
##### *4.1.1.1. Ciclo 2008*

La producción de frutos total y comercial acumulada en los sectores este y oeste se observa en las figuras 4a, 4b y 4c y figuras 5a, 5b y 5c. El sistema AL alcanzó valores de producción total (figura 4c) y comercial (figura 5c) significativamente superiores en el sector este respecto al oeste durante todo el ciclo de cultivo. Además, este sector fue el más precoz, con valores de producción total de  $2,68 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2}$  en el sector este frente a  $1,70 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2}$  en el sector oeste y valores de producción comercial

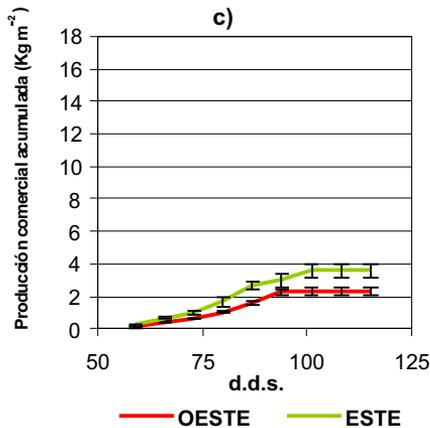
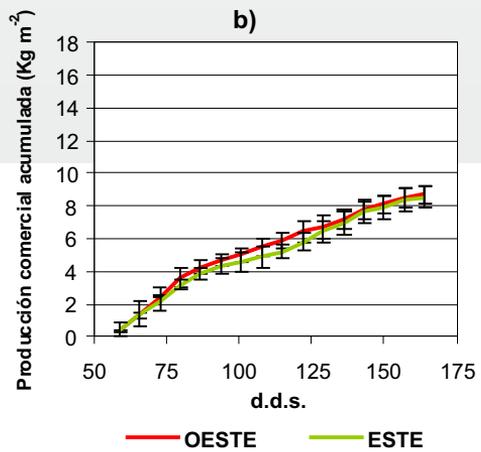
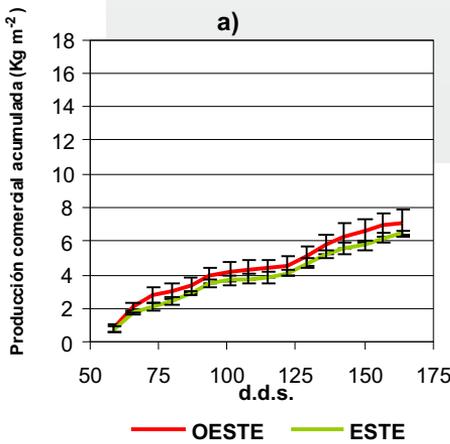
de  $1,67 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $1,04 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en el sector este y oeste respectivamente, a los 80 d.d.s. En la producción final (109 d.d.s.) también destaca el sector este, con  $9,17 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  frente a  $7,16 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (sector oeste) en cuanto producción total y con  $3,60 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  frente a  $2,35 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (sector oeste) de producción comercial. Este hecho podría deberse al sobrecalentamiento continuado durante la tarde del lado oeste de la parcela. Este efecto no se observó en los tratamientos bajo malla, presentando valores de producción total (figuras 4a y 4b) y comercial (figuras 5a y 5b) similares en ambas orientaciones durante todo el ciclo debido al sombreado generado. Romacho y col. (2006) tampoco obtuvieron diferencias significativas en la producción de tomate cherry entre los sectores este y oeste bajo una malla de color verde y una malla de color blanco/negro. Las producciones total y comercial en M (figura 4a y 5a) y MN (figura 4b y 5b) no mostraron diferencias significativas entre sectores.

La producción comercial final fue del 50% de la producción total en M y del 57% en MN, aproximadamente. En AL este valor fue menor, llegando al final de ciclo a valores próximos al 30% en el sector este y hasta el 25% en el sector oeste, debido al estrés sufrido por el cultivo en dicho sector, lo que provocó la aparición cada vez mayor de frutos de baja calidad.





**Figura 4.** Evolución de la productividad de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) total acumulada de los sectores oeste y este en el interior del invernadero de malla sin nebulización (a), bajo malla con nebulización (b) y al aire libre (c) durante el ciclo 2008. Las barras indican una desviación estándar de la media



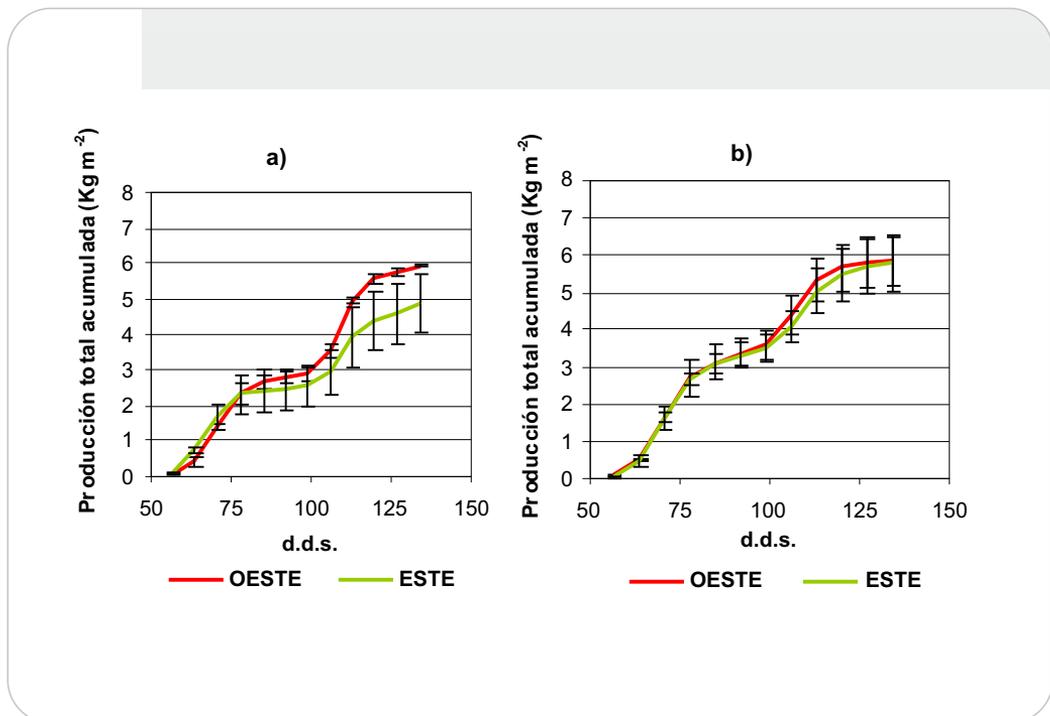
**Figura 5.** Evolución de la productividad de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) comercial acumulada de los sectores oeste y este en el interior del invernadero de malla sin nebulización (a), bajo malla con nebulización (b) y al aire libre (c) durante el ciclo 2008. Las barras indican una desviación estándar de la media

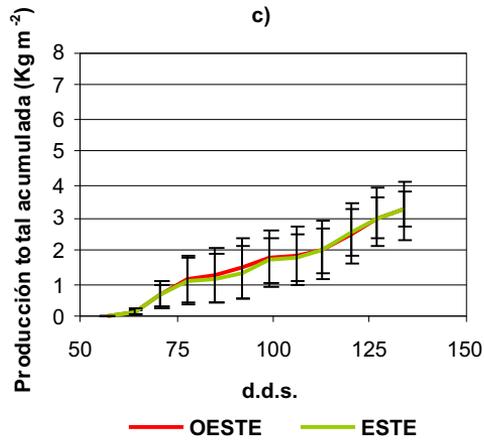
#### 4.1.1.2. Ciclo 2009

En el ciclo 2009 se registraron temperaturas muy elevadas (próximas a 40 °C) durante 30 días y 6 horas al día aproximadamente, incluso en el interior del invernadero con el sistema de nebulización en funcionamiento durante una media de 3 horas diarias aproximadamente, siendo la producción total y comercial inferior en este ciclo.

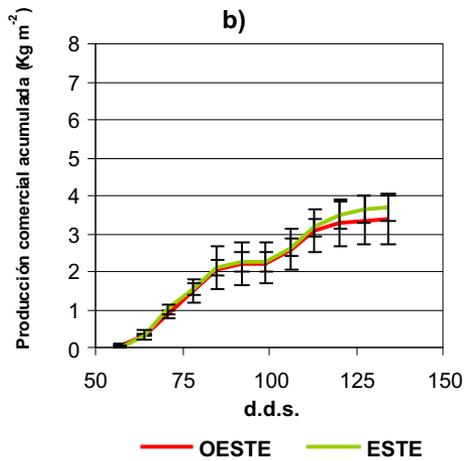
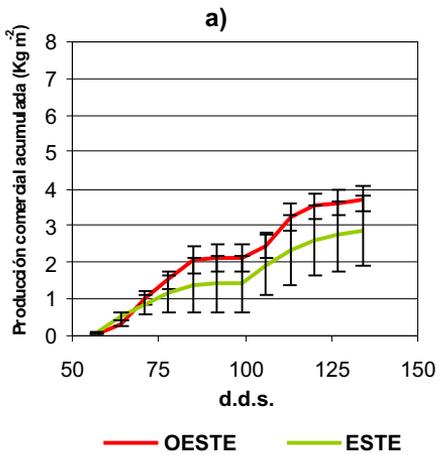
En la producción total (figuras 6a, 6b y 6c) y comercial (figuras 7a, 7b y 7c) no se encontraron diferencias significativas entre los sectores este y oeste en los sistemas MN, M y AL. Las producciones total y comercial obtenidas en MN (figuras 6b y 7b) y AL (figuras 6c y 7c) fueron prácticamente iguales en ambos sectores. En el sistema M, las producciones fueron ligeramente mayores en el sector oeste, a partir de los 78 d.d.s. en la producción total y de los 71 d.d.s. en la comercial.

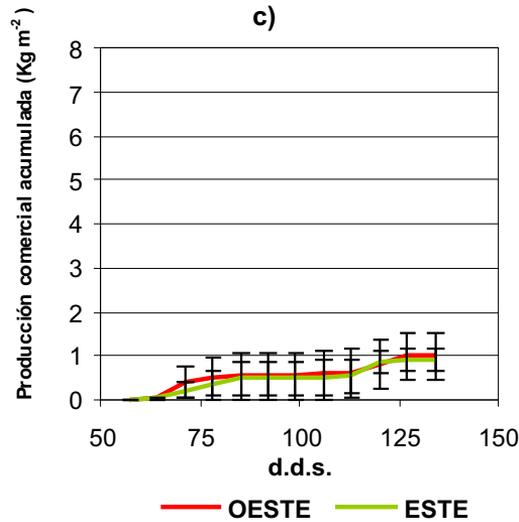
Debido a las condiciones climáticas extremas alcanzadas, el desarrollo del cultivo se vio afectado en mayor medida al aire libre obteniendo producciones comerciales muy bajas (hasta 0,9 Kg·m<sup>-2</sup>). Los sistemas M y MN redujeron la producción comercial un 40% aproximadamente en ambos sectores durante todo el ciclo, respecto a la producción total.





**Figura 6.** Evolución de la productividad de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) total acumulada de los sectores oeste y este en el interior del invernadero de malla sin nebulización (a), bajo malla con nebulización (b) y al aire libre (c) durante el ciclo 2009. Las barras indican una desviación estándar de la media





**Figura 7.** Evolución de la productividad de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) comercial acumulada de los sectores oeste y este en el interior del invernadero de malla sin nebulización (a), bajo malla con nebulización (b) y al aire libre (c) durante el ciclo 2009. Las barras indican una desviación estándar de la media

#### 4.1.2. Producción total y comercial acumulada por sistemas de cultivo

##### 4.1.2.1. Ciclo 2008

El riego falló durante un breve periodo de tiempo los 109 d.d.s. debido a un fallo en el sistema. AL no pudo recuperarse al reiniciarse el riego (2 días después), sin embargo, M y MN se recuperaron rápidamente, lo que parece indicar que los cultivos bajo malla pueden mejorar su capacidad de recuperación tras una situación de estrés hídrico.

La evolución de la producción total y comercial acumulada en los diferentes sistemas de cultivo durante este ciclo, se representa en la tabla 6. Al principio del ciclo (59 d.d.s. y 66 d.d.s), la producción total fue significativamente mayor en M. A los 80 d.d.s., sin embargo, la producción total fue significativamente superior en MN ( $4,50 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) respecto a M ( $3,63 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y AL ( $2,19 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Igual ocurrió en la producción comercial ( $3,40 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en MN,  $2,72 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en M y  $1,36 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en AL). Esto indica una mayor precocidad del sistema MN respecto a M y AL.

La producción total final de MN y M (164 d.d.s.) fue similar, con valores de  $14,85 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $14,14 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectivamente. A los 109 d.d.s. (final del ciclo en AL) existieron diferencias significativas entre sistemas, siendo MN mayor que AL y M.

La producción comercial acumulada fue significativamente superior a partir de 80 d.d.s. en MN respecto a M y AL hasta el final del ciclo (tabla 6).

**Tabla 6.** Producción de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) total y comercial acumulada en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

d.d.s.	TOTAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )			COMERCIAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )		
	M	MN	AL	M	MN	AL
59	0,80a	0,40b	0,17c	0,80a	0,40b	0,17c
66	2,03a	1,49b	0,64c	1,88a	1,36b	0,57c
73	2,91a	2,88a	1,16b	2,42a	2,37a	0,84b
80	3,63b	4,50a	2,19c	2,72b	3,40a	1,36c
87	4,69b	5,91a	4,71b	3,15b	4,08a	2,16c
94	6,04b	6,62b	7,64a	3,72b	4,50a	2,91c
101	7,00b	7,28b	7,99a	3,95b	4,82a	2,97c
109	8,00c	8,59a	8,16b	4,03b	5,20a	2,97c
115	8,27b	8,94a	-	4,10b	5,55a	-
122	8,82a	10,35a	-	4,34b	6,13a	-
129	10,08a	11,27a	-	4,87b	6,60a	-
136	11,39a	12,09a	-	5,49b	7,06a	-
143	12,59a	13,24a	-	5,96b	7,71a	-
150	12,98a	13,72a	-	6,17b	8,03a	-
157	13,65a	14,39a	-	6,57b	8,47a	-
164	14,14a	14,85a	-	6,78b	8,65a	-

#### 4.1.2.2. Ciclo 2009

En la productividad acumulada de judía verde total y comercial (tabla 7) de los tres sistemas de cultivo en este ciclo, se observó una mayor precocidad en el sistema MN respecto a M y AL. Así, a los 78 d.d.s. la producción total en MN fue significativamente superior ( $2,67 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) respecto a M ( $2,31 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y AL ( $1,10 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). En cuanto a la producción comercial los valores en este periodo (78 d.d.s.) fueron significativamente superiores en MN ( $1,51 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y M ( $1,31 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) respecto a AL ( $0,40 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Al final del ciclo (135 d.d.s.), para los sistemas bajo malla, se obtuvieron valores similares de producción total ( $5,80 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de MN y  $5,40 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de M) y comercial ( $3,53 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de MN y  $3,28 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de M). El sistema de nebulización, activado en las horas centrales del día, consiguió aumentar aunque no significativamente la producción comercial respecto a M. La producción final en AL fue significativamente inferior a la obtenida en M y MN, con diferencias de hasta  $3 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de producción total y  $2,5 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  de producción comercial, aproximadamente.

La producción total obtenida en AL a finales de ciclo fue mayor que la resultante en la experiencia de Roldán y col. (2001), que obtuvieron una producción total de judía verde de enrame de la misma variedad (*Festival*) al aire libre en ciclo de verano de  $2,97 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Las elevadas temperaturas registradas durante el ciclo 2009 provocaron la obtención de un mayor número de frutos deformados y manchados no comerciales, en todos los sistemas, con especial incidencia en AL. En este último caso, la reducción de la producción comercial respecto a la total fue muy acusada, con diferencias de 90% aproximadamente, a partir de los 99 d.d.s. Las condiciones en AL, por tanto, no fueron adecuadas para un buen desarrollo del cultivo.

Cuartero y col. (2001) y Peet y col. (1997), indican que las altas temperaturas afectan a procesos fundamentales para la producción, como la floración y cuajado de frutos, disminuyendo la productividad. Lorenzo y col. (2010) demostraron que las temperaturas de aire que sobrepasan un umbral óptimo limitan la producción de los cultivos hortícolas, ya que aumentan la tasa de transpiración pudiendo ocasionar una disminución de la conductancia estomática y una marchitez de las plantas, afectando negativamente a la intercepción de radiación. Además, reducen la calidad del polen y provocan anomalías florales que pueden reducir el número de frutos (Heuvelink y Dorais, 2005).

Según Hernández (2009), el aborto de flores debido a condiciones climáticas inadecuadas durante el proceso de floración-fecundación, es un claro limitante para la bioproductividad en cultivos de judía. El número de frutos y flores abortadas en plantas de judía sometidas a elevadas temperaturas está relacionado en mayor medida con la reducción en la viabilidad de los granos de polen que con el daño en las estructuras florales femeninas (Monterosso y Wein, 1990). Un estudio sobre el efecto de diferentes temperaturas sobre distintas variedades de judía (Susuki y col., 2001), indica que temperaturas elevadas (mayores de 28 °C) reducen el número de vainas por planta y por tanto, el rendimiento total. Estas temperaturas hacen que la estabilidad y viabilidad del polen sea escasa, ocasionando abortos y abscisión de flores. Jiffon y Wolfe (2005) observaron que en los estadíos finales del cultivo, una temperatura más elevada que la óptima sobre plantas de judía, tenía un efecto negativo sobre el desarrollo y crecimiento de las flores y los frutos.

**Tabla 7.** Producción de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) total y comercial acumulada en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P<0,05$ )

d.d.s.	TOTAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )			COMERCIAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )		
	M	MN	AL	M	MN	AL
57	0,08a	0,07a	0,00b	0,06a	0,05a	0,00b
64	0,59a	0,49a	0,12b	0,43a	0,34a	0,03b
71	1,54a	1,63a	0,66b	0,92a	0,95a	0,29b
78	2,31b	2,67a	1,10c	1,31a	1,51a	0,40b
85	2,52b	3,10a	1,22c	1,71a	2,10a	0,50b
92	2,59b	3,34a	1,39c	1,75a	2,23a	0,50b
99	2,72b	3,54a	1,74c	1,76a	2,25a	0,50b
106	3,23b	4,21a	1,82c	2,18a	2,59a	0,52b
113	4,43a	5,16a	2,03b	2,77a	3,12a	0,56b
120	4,98a	5,56a	2,52b	3,06a	3,39a	0,81b
127	5,18a	5,74a	2,70b	3,16a	3,49a	0,93b
134	5,40a	5,80a	2,90b	3,28a	3,53a	0,93b

### 4.1.3. Producción final total y comercial acumulada por sistemas de cultivo

La tabla 8 presenta los datos de productividad final de judía verde en los ciclos 2008 y 2009. En 2008, el sistema de cultivo MN alcanzó la máxima producción significativa total y comercial respecto a M a los 109 d.d.s. y respecto a AL en cada ciclo. A los 164 d.d.s. se encontraron diferencias significativas mayores en MN respecto a M en la producción comercial pero no en la total. En 2009, M y MN alcanzaron una producción total y comercial significativamente superior respecto a AL.

**Tabla 8.** Producción final de judía verde ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) total y comercial acumulada total en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante los ciclos 2008 y 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P<0,05$ )

CICLO	d.d.s.	TOTAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )			COMERCIAL ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )		
		M	MN	AL	M	MN	AL
2008	109	8,00c	8,59a	8,16b	4,03b	5,20a	2,97c
	164	14,14a	14,85a	-	6,78b	8,64a	-
2009	135	5,40a	5,80a	3,22b	3,06a	3,59a	0,91b

En ambos casos (producción total y comercial) la interacción año x sistema de cultivo fue significativa ( $p=0,0000$  en producción total y comercial).

No existen estudios sobre la producción de judía verde bajo invernadero de malla, pero sí hay bibliografía sobre dicho cultivo en invernaderos de plástico.

En invernadero de plástico, en ciclos de invierno se han alcanzado producciones totales de judía verde de mata baja de  $2,36 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en un invernadero simétrico con suelo enarenado (Escobar, 2004). Para variedades de enrame bajo plástico la producción comercial puede ser de  $1,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en condiciones desfavorables (días cortos y fríos) y llegar incluso a  $6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en días largos, temperaturas favorables y ciclos de 90 días de recolección (Escobar, 2004).

En invernadero de plástico, durante la primavera, la producción total y comercial de judía verde de enrame (variedad *Festival*) fue de  $4,95 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $4,19 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  respectivamente (Meca y

Gázquez, 2005) y las máximas producciones total y comercial alcanzadas con judía verde de mata baja bajo las mismas condiciones no superaron los  $1,58 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $1,46 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectivamente (Meca y col., 2007). Estas producciones también son inferiores a las obtenidas, en nuestro caso, bajo malla. Otros estudios con judía verde de enrame bajo plástico y primavera, han obtenido producciones comerciales entre  $4$  y  $4,5 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  (Hoyos y col., 2007) y producciones total y comercial de  $3,38 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $2,90 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectivamente (Meca y Gázquez, 2004).

En nuestras condiciones, el sombreo generado por la malla demostró ser un método eficaz en el aumento significativo de la productividad total y comercial de un cultivo de judía en primavera-verano frente al cultivo al aire libre. Otros trabajos han demostrado la eficacia del sombreo con diferentes cultivos, así, Lorenzo y col. (2006) en un invernadero de plástico con sombreado móvil obtuvieron una producción comercial de pepino de  $18,6 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  frente a  $16,3 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}$  en el invernadero de referencia y sobre la producción precoz de pimiento (Sánchez-Guerrero y col., 2008).

En el estudio estadístico del destrío total acumulado no se observaron diferencias significativas entre sistemas de cultivo en el ciclo 2008. Sin embargo, en el ciclo 2009, el destrío en el sistema AL fue significativamente inferior respecto a M y MN.

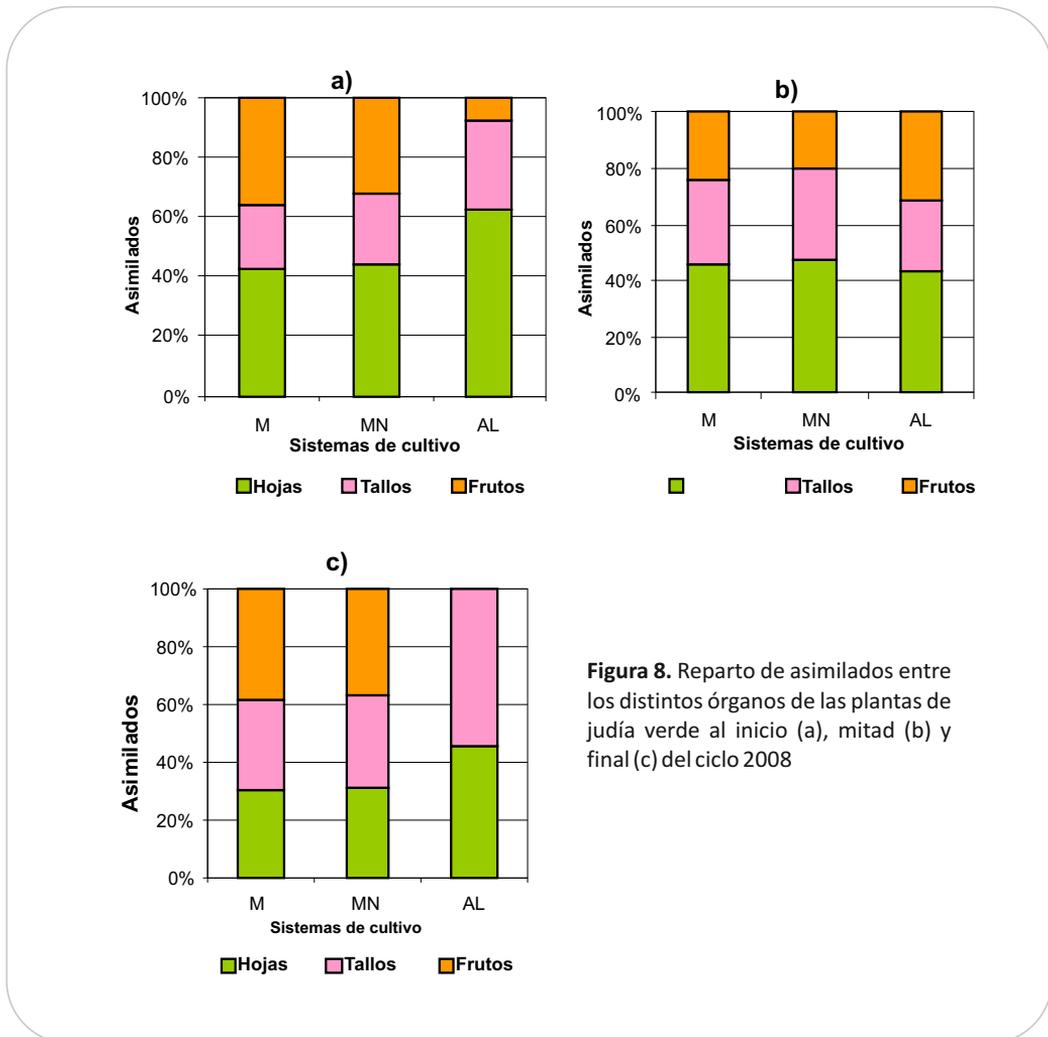
## 4.2. Análisis de crecimiento

En las figuras 8 y 9 se observa el reparto de asimilados entre los distintos órganos de la planta, al inicio, mitad y final de los ciclos de cultivo 2008 y 2009.

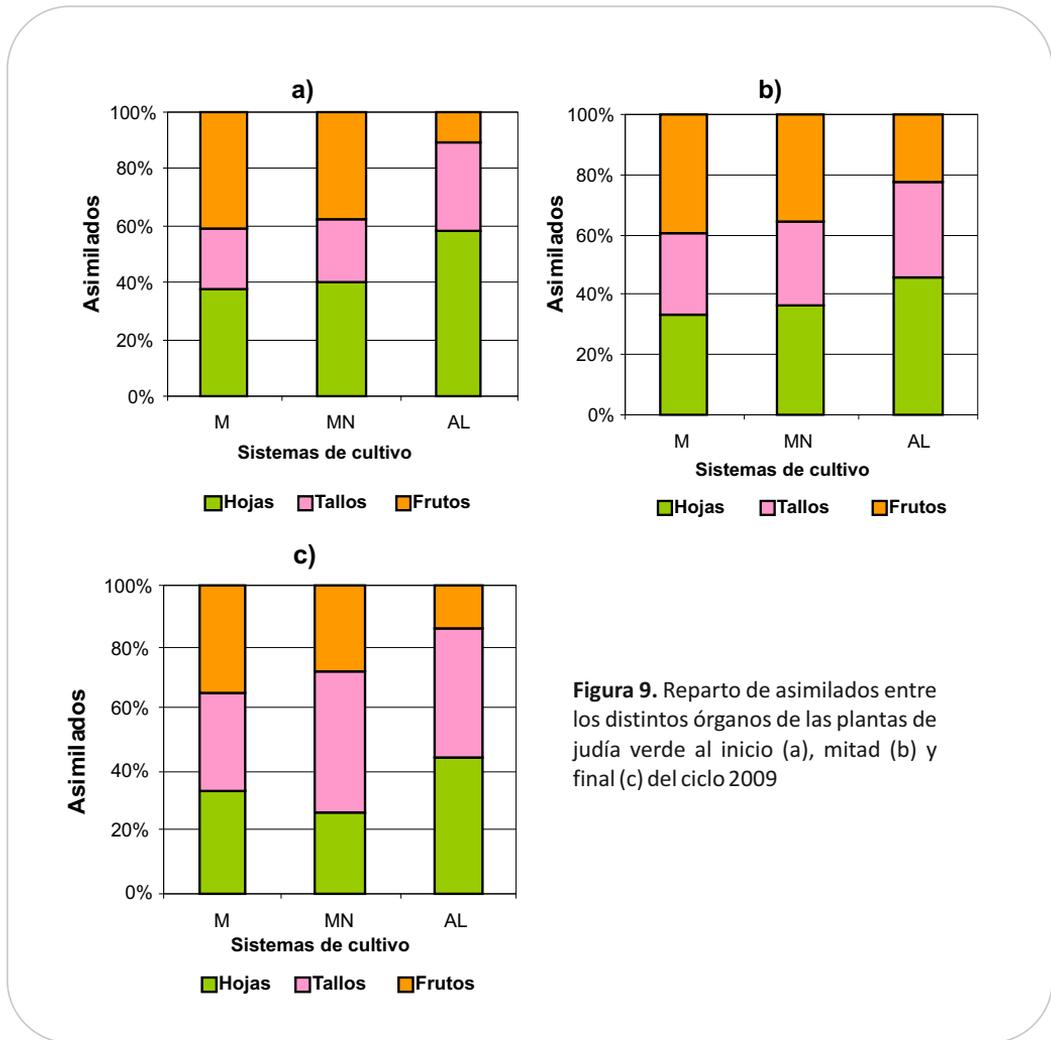
Durante el ciclo 2008, al inicio (figura 8a), mitad (figura 8b) y final del ciclo (figura 8c) la proporción de hojas, tallos y frutos totales fueron similares en los sistemas bajo malla. En AL, sin embargo, la proporción de frutos fue menor al inicio del ciclo (7,51% frente a 32,09% de MN y 36,19% de M), aumentando a mitad del ciclo, siendo superior (35,07% frente a 24,45% de M y 20,32% de MN) y volviendo a disminuir al final (0% frente a 36,43% en MN y 38,13% en M). Esto parece demostrar una mayor precocidad del cultivo bajo malla, que comienza a derivar asimilados hacia los frutos con más antelación.

Al inicio y mitad del ciclo 2009 (figura 9a y 9b), los sistemas M y MN presentaron proporciones de hojas, tallos y frutos muy parecidas. A final de ciclo (figura 9c), en MN se obtuvo una

mayor proporción de tallos (46,5%) debido a un deshojado prematuro de las plantas. El sistema AL siempre mantuvo una menor proporción de asimilados en frutos, indicando una mayor derivación de los mismos hacia las partes vegetativas de la planta, en detrimento de la productividad de la misma.



**Figura 8.** Reparto de asimilados entre los distintos órganos de las plantas de judía verde al inicio (a), mitad (b) y final (c) del ciclo 2008



**Figura 9.** Reparto de asimilados entre los distintos órganos de las plantas de judía verde al inicio (a), mitad (b) y final (c) del ciclo 2009

#### 4.2.1. Índice de Área Foliar (LAI)

En lo que se refiere a los valores del índice de área foliar, no se observaron diferencias significativas entre orientaciones en los tratamientos estudiados en ambos ciclos. Tampoco se encontró ninguna tendencia diferenciadora clara.

En las tablas 9 y 10 se puede ver la evolución temporal del índice de área foliar (LAI) durante los ciclos 2008 y 2009 en los sistemas de cultivo M, MN y AL. Durante el ciclo 2008 (tabla 9), el LAI no mostró diferencias significativas entre los tres sistemas hasta los 77 d.d.s. El estrés hídrico sufrido por la falta de agua, en 2008, a los 98 d.d.s., redujo el desarrollo de las plantas en todos los sistemas de cultivo y, por tanto, el índice de área foliar. En los sistemas bajo malla, la planta se recuperó alcanzando valores del LAI significativamente superiores en MN respecto a M al final del ciclo (132 d.d.s. y 147 d.d.s.)

Durante el ciclo 2009 (tabla 10) se produjeron oscilaciones aleatorias en las diferencias del LAI entre los tres sistemas de cultivo, lo cual, no demuestra una ventaja clara en el desarrollo foliar en ninguno de los sistemas. El LAI debería crecer exponencialmente conforme avanza el ciclo de cultivo (Castilla, 2007), pero en nuestro caso las temperaturas excesivas limitaron este crecimiento. Según Lorenzo y col. (2010), el dosel vegetal debe alcanzar lo antes posible el valor del índice de área foliar que permita interceptar el mayor porcentaje de la radiación incidente sobre el cultivo con el fin de optimizar la bioproductividad. En nuestro caso, no se observaron diferencias significativas entre sistemas al principio del ciclo.

En algunos estudios de invernadero plástico en que el factor limitante es la radiación, se observaron una tasa de crecimiento y área foliar superiores en tratamientos sombreados, demostrando como índices menores de radiación promueven una mayor área foliar (Schwarz y col., 2002; Sandri y col., 2003; Sánchez-Guerrero y col., 2006; García, 2007; López-Marín y col., 2009). En nuestro caso, el principal factor limitante no es la radiación, sino la temperatura, por lo que no se observó esta reducción de área foliar con el sombreado.

La interacción año x sistema de cultivo no fue significativa. Dentro de un mismo sistema de cultivo tampoco se encontraron diferencias significativas entre años.

**Tabla 9.** Evolución del índice de área foliar (LAI) ( $m^2 \cdot m^{-2}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

Ciclo 2008			
d.d.s.	M	MN	AL
22	0,19a	0,14b	0,13a
34	0,65a	0,45a	0,46a
44	2,03a	1,51a	1,48a
55	4,98a	6,01a	4,69a
66	8,72a	12,31a	8,68a
77	7,12b	10,19a	9,95b
86	7,71a	9,27a	9,26a
98	4,59c	8,08a	6,20b
107	4,71b	7,90a	7,41b
119	7,47a	7,72a	-
132	7,86b	10,77a	-
147	10,14b	13,09a	-

**Tabla 10.** Evolución del índice de área foliar (LAI) ( $m^2 \cdot m^{-2}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

Ciclo 2009			
d.d.s.	M	MN	AL
26	0,40a	0,34a	0,24b
40	1,87a	2,03a	1,64a
54	5,64a	6,99a	4,70a
68	8,31b	11,85a	7,84b
82	4,37b	5,30b	9,91a
96	6,69a	7,37a	8,50a
110	8,02a	8,51a	9,33a
131	10,27a	8,78a	7,04a

#### 4.2.2. Área Foliar Específica (SLA)

El análisis del área foliar específica no mostró diferencias significativas entre orientaciones (este y oeste) en los ciclos estudiados. Hernández (2009), tampoco encontró diferencias del SLA entre sectores (norte y sur) en un cultivo de judía en primavera bajo invernaderos de plástico (parral y multitúnel) ya que las diferencias radiativas entre sectores eran mínimas.

Las tablas 11 y 12 muestran la evolución temporal del área foliar específica (SLA) de la judía verde durante los ciclos 2008 y 2009 en los sistemas de cultivo M, MN y AL.

Durante el ciclo 2008 no se apreciaron diferencias claras entre sistemas de cultivo. Durante el ciclo 2009, sí se observaron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo evaluados a partir de los 68 d.d.s., con valores de SLA en M y MN superiores a los de AL, lo que indica un desarrollo de hojas más delgadas en las plantas sombreadas, coincidiendo con Roderick y col. (1999) que observó un incremento del SLA bajo condiciones de baja iluminación. Lorenzo y col. (2003) y (2004) y García, (2007) demostraron este efecto en cultivo de tomate bajo plástico sombreado.

La interacción año x sistema de cultivo no fue significativa. Al considerar los sistemas de cultivo, se observó que en los sistemas bajo malla los valores obtenidos en 2009 fueron significativamente mayores a los obtenidos en 2008 ( $p=0,0024$ ).

**Tabla 11.** Evolución del área foliar específica (SLA) ( $m^2 \cdot Kg^{-1}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P<0,05$ )

Ciclo 2008			
d.d.s.	M	MN	AL
22	5,99a	5,64a	4,50b
34	5,93a	5,83a	4,46b
44	4,58a	3,15a	5,05a
55	3,12c	5,88a	4,10b
66	4,16a	6,67a	4,25a
77	4,14a	6,15a	4,07a
86	5,12a	4,90a	3,77a
98	6,28a	6,94a	3,99b
107	2,27a	5,51a	5,37a
119	5,83a	4,31b	-
132	9,20a	8,69a	-
147	7,99a	10,19a	-

**Tabla 12.** Evolución del área foliar específica (SLA) ( $\text{m}^2 \cdot \text{Kg}^{-1}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ )

Ciclo 2009			
d.d.s.	M	MN	AL
26	7,22a	8,70a	9,13a
40	10,29a	11,87a	6,10a
54	8,06a	8,67a	4,98a
68	6,36a	6,69a	5,56b
82	6,19a	6,95ab	5,35ac
96	10,97a	6,21b	5,72b
110	9,83a	7,66b	7,21c
131	6,92a	8,81ab	5,58ac

#### 4.2.3. Biomasa (CDW)

No se observaron diferencias significativas en lo que se refiere a los valores de CDW entre orientaciones en ambos ciclos.

En las tablas 13 y 14 se puede ver la evolución temporal de la biomasa (CDW) de la judía verde durante los ciclos 2008 y 2009 en los sistemas de cultivo M, MN y AL. Durante el ciclo 2008 hubo diferencias significativas entre los sistemas bajo malla y el exterior, siendo superiores en AL a partir de los 77 d.d.s. y entre M y MN (superiores en MN) a partir de los 107 d.d.s. hasta final del ciclo (tabla 13). A principio de ambos ciclos, no se produjo una aceleración del crecimiento en ningún sistema de cultivo. Durante el ciclo 2009 las diferencias significativas de AL respecto a los tratamientos bajo malla, tuvieron lugar durante todo el ciclo excepto a los 54 d.d.s. y 68 d.d.s.; a partir de los 82 d.d.s. fue significativamente superior que M y MN (tabla 14).

Las mejores condiciones climáticas generadas bajo malla favorecieron la expansión foliar que, si bien propician una mayor interceptancia de la radiación, no llegó a compensar la reducción de radiación incidente, de manera que la producción de materia seca fue menor que al aire libre. Resultados similares obtuvieron Sánchez-Guerrero y col. (2006) en un cultivo de pepino bajo plástico, en primavera, con sombreado móvil.

La interacción año x sistema de cultivo no fue significativa. Dentro de cada sistema de cultivo tampoco se encontraron diferencias significativas entre años.

**Tabla 13.** Evolución de la biomasa (CDW) ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2008. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P<0,05$ )

Ciclo 2008			
d.d.s.	M	MN	AL
22	0,04a	0,04a	0,04a
34	0,16a	0,11a	0,15a
44	0,70a	0,91a	0,43a
55	2,57a	1,80a	1,73a
66	3,19a	3,47a	3,27a
77	3,01b	3,12b	4,10a
86	3,53b	3,19b	5,70a
98	2,14b	2,97ba	3,92a
107	2,38b	4,04a	3,02b
119	3,11b	4,90a	-
132	2,29b	3,12a	-
147	2,84b	3,24a	-

**Tabla 14.** Evolución de la biomasa (CDW) ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) de un cultivo de judía verde en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL) durante el ciclo 2009. Números seguidos de distinta letra dentro de la misma línea indican diferencias significativas ( $P<0,05$ )

Ciclo 2009			
d.d.s.	M	MN	AL
26	0,09a	0,07a	0,05b
40	0,31b	0,27b	0,41a
54	1,15a	1,48a	1,49a
68	3,21a	3,66a	3,11a
82	2,80b	2,41b	4,53a
96	3,30b	3,20b	5,03a
110	4,23a	3,36b	4,06a
131	5,00b	2,72b	6,01a

### 4.3. Consumo y eficiencia hídrica

La tabla 15 muestra los valores de consumo de agua y tiempo total de funcionamiento del sistema de nebulización durante los dos ciclos de cultivos evaluados. Para el ciclo 2008, el consumo total de agua por el sistema de nebulización fue de  $174,5 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ . Para el ciclo 2009, el consumo total de agua por el sistema de nebulización fue de  $229,9 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$ , superior al agua consumida en el ciclo 2008 debido al alto DPV resultante de las elevadas temperaturas alcanzadas, como se ha visto en el capítulo anterior. El consumo total de agua de un sistema de nebulización de baja presión para mantener un nivel de DPV de 1,5 kPa en un cultivo de pimiento bajo plástico fue de  $219 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$  (Meca y col., 2006) y para un nivel de DPV de 1 kPa fue de  $319 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$  (Meca, 2005). En nuestro caso, el consumo de agua fue menor para un DPV de 2,5 kPa.

**Tabla 15.** Consumo de agua total ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ) y tiempo total de funcionamiento (h) del sistema de nebulización durante los ciclos 2008 y 2009

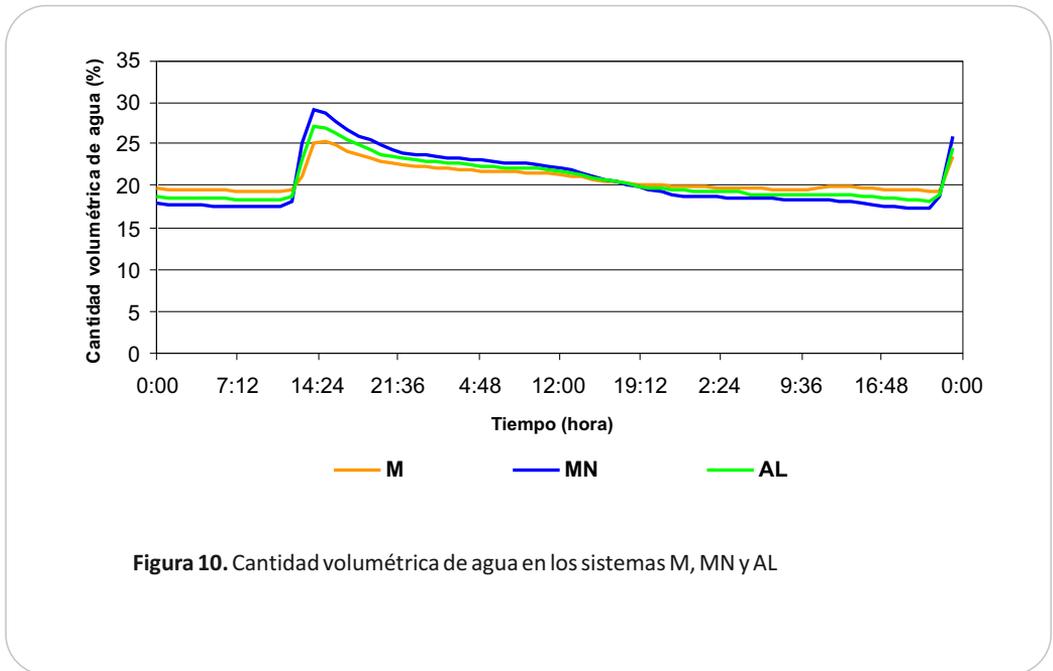
	CICLO 2008	CICLO 2009
Consumo total ( $\text{L m}^{-2}$ )	174,5	229,9
Tiempo total (h)	188,3	242,9

Los valores del consumo total del sistema de riego se observan en la tabla 16. En ambos ciclos, el sistema AL consumió mayor cantidad de agua respecto a los sistemas de cultivo bajo malla,  $227,37 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$  en 2008 (a los 109 d.d.s.) y  $349,98 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$  en 2009. El consumo hídrico en 2009 fue menor que en 2008, ya que, la duración del ciclo fue menor.

**Tabla 16.** Consumo de agua total ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$ ) del sistema de riego durante los ciclos 2008 y 2009 en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL)

	M	MN	AL
CICLO 2008	420,21	413,96	227,37
CICLO 2009	275,65	271,82	349,98

El consumo de agua de riego en los sistemas de cultivo MN y M fue similar, lo que indica que la nebulización no disminuyó el consumo hídrico respecto a M. La figura 10 muestra la cantidad volumétrica de agua en suelo en los sistemas M, MN y AL la cual se mantuvo entre 20-30% mediante los sensores de humedad (ECH2O EC-5, Decagon devices) durante ambos ciclos de cultivo.



**Figura 10.** Cantidad volumétrica de agua en los sistemas M, MN y AL

Möller y Assouline (2007), estudiaron el consumo de agua de un cultivo de pimiento bajo un invernadero cubierto con una malla negra y al aire libre, concluyendo que las necesidades de agua bajo malla fueron significativamente más bajas que las calculadas para el cultivo en aire libre, proporcionando un potencial de ahorro de agua bajo cubierta de malla, coincidiendo con Möller y col. (2004a) y (2004b).

La reducción de la radiación incidente sobre el dosel vegetal sombreado por la malla disminuyó la transpiración del cultivo (Medrano y col., 2004). Tanny (2010) observó una reducción del consumo de riego del 50% en invernadero de malla respecto al aire libre en cultivo de pimiento y un aumento en la eficiencia del uso del agua. En nuestro caso, la reducción del consumo total de agua de riego bajo malla respecto al exterior fue menor, en un 21% durante el ciclo 2009. Esta conclusión coincide con experimentos en cultivos de tomate y pepino, donde se redujo notablemente la absorción hídrica en invernadero bajo sombreado móvil respecto al invernadero de referencia sin sombreado (Lorenzo y col., 2006).

Hoy día uno de los aspectos clave para el análisis de la eficiencia de la gestión de los recursos naturales de los sistemas hortícolas intensivos, es precisamente la eficiencia en el uso del agua (EUA) (Fernández y Camacho, 2005). Se cuantificó la EUA con el fin de estimar la productividad comercial del cultivo en función del gasto hídrico (riego + nebulización). La tabla 17 muestra la EUA de los sistemas MN, M y AL para los ciclos 2008 y 2009. En el sistema MN se incluyó también el consumo de agua en la nebulización.

**Tabla 17.** Eficiencia en el uso del agua (EUA) ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) para los ciclos 2008 y 2009 en el interior del invernadero de malla sin nebulización (M), bajo malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL)

	M	MN	AL
CICLO 2008	16,1	14,7	8,4
CICLO 2009	11,1	7,20	2,6

La EUA en AL fue menor que en MN y M pues para producir un kilogramo de judías se necesitaron 119 litros de agua en 2008 frente a 62 L en M y 68 L en MN y 384,6 L en 2009 frente a 90 L en M y 139 L en MN. Un consumo de agua mucho más alto fue el indicado por Stansell y Smittle (1980) que requirieron 177 litros de agua por kilogramo de producto en un cultivo de judía verde de primavera al aire libre. Es importante reducir el consumo de agua sin reducir la producción, lo cual se refleja en una mayor EUA. Según Barros y Hanks (1993), el acolchado del suelo aumentó la eficiencia del uso del agua, ya que mantuvo la humedad de suelo evitando la evaporación. En nuestro caso, el acolchado pudo haber mejorado la EUA.

La EUA aumentó en torno al 52% en M respecto a AL en 2008 y alrededor del 76% en 2009. Este resultado coincide con experimentos bajo invernaderos de plástico sombreados frente a invernaderos de referencia en cultivos de pepino (Caparros y col., 2005; Lorenzo y col., 2006; Sánchez-Guerrero y col., 2008) y tomate (Lorenzo y col., 2003; Lorenzo y col., 2006).

En nuestro estudio, el invernadero adolece de aislamiento del exterior durante la nebulización, lo que hace que una gran parte del agua nebulizada se pierda hacia el exterior de la estructura (malla permeable), donde las condiciones de temperatura y sequedad son extremas. Por

tanto, se deberá optimizar el manejo de equipamientos y evaluar sistemas complementarios a la nebulización para reducir su consumo de agua y mantener el microclima.

Si comparamos los sistemas M y MN, observamos que la EUA en M fue mayor que en MN para los dos ciclos, siendo hasta un 35% superior en 2009, año de condiciones externas más desfavorables. También se consiguió mayor eficiencia en el uso del agua bajo sombreado móvil exterior en cultivo de tomate (Lorenzo y col., 2004; García, 2007) y bajo sombreado fijo en pimiento (Gázquez y col., 2006) respecto al cultivo bajo nebulización. La reducción del consumo de agua de riego, debido al empleo del sistema de nebulización, no compensó el gasto extra de agua por el funcionamiento de dicho sistema, coincidiendo con Montero y col. (2003) y Gázquez y col. (2007).

## 5. Conclusiones

-El sombreado generado por la malla demostró ser un método eficaz en el aumento significativo de la productividad total y comercial de un cultivo de judía en primavera-verano frente al cultivo al aire libre.

-Existe una mayor precocidad en los sistemas de cultivo bajo malla respecto al aire libre, al derivar asimilados hacia los frutos con más antelación.

-Los índices de crecimiento evaluados no mostraron ninguna tendencia clara entre sistemas de cultivo y años. Entre sectores este y oeste no se observaron diferencias significativas en ninguno de ellos.

-El sistema AL consumió mayor cantidad de agua en riego respecto a los sistemas bajo malla. Si añadimos el consumo de agua correspondiente al sistema de nebulización, se inducen unos valores de EUA menores en MN respecto a M, debido a la pérdida de parte del agua dispersa hacia el exterior de la cubierta de malla permeable. Se deberán evaluar sistemas complementarios a la nebulización para reducir su consumo de agua y mantener el microclima creado.

## 6. Bibliografía

Baille, A. and Tchamitchian, M. 1993. Solar radiation in greenhouses. Crop structure and light microclimate. Characterization and applications. Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Sinoquet, H. (eds). INRA Editions. 93-105.

Banuelos, G.S. Zayed, A. Mackey, B. 2002. Growth of faba bean irrigated with saline drainage water. *Journal of Plant Nutrition* 25(5): 1101-1114.

Barros, L.C.G. and Hanks, R. J. 1993. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch and irrigation. *Agronomy Journal* 85(3): 692-697.

Binnie, R.C. and Clifford, P.E. 1999. Sink characteristics of reproductive organs of dwarf bean in relation to likelihood of abscisión. *Crop science* 39: 1077-1082.

Borcher-Zampini, C., Glamm, A.B., Hoddinott, J., Swanson, C.A. 1980. Interactions in source-sink patterns by modifications of source strength. *Plant physiology* 65: 1116-1120.

Caparrós, I., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C., Botelho, R., Lorenzo, P. 2005. El sombreado móvil exterior del invernadero: efecto sobre el microclima, la eficiencia en el uso del agua y la producción de un cultivo de pepino bajo diferentes niveles de salinidad de la solución nutritiva. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5: 91-97.

Casas, A. 1999. Cultivos sin suelo II. Curso Superior de Especialización. Editores: Fernández, M., Cuadrado, I.M. Volumen 5: 257-266.

Castilla, N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. 462 pp.

Cuartero, J., Fernández-Muñoz, R., González-Fernández, J.J. 2001. Estrés abióticos en: El cultivo del tomate. Mundi-Prensa. Madrid. 351-383.

Cuenca, R.H. 1989. Irrigation system design: An engineering approach. Prentice Hall, New Jersey. 552 pp.

Dooreboos, J. and Kassam, A.M. 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO. Riego y drenaje n° 33. FAO. Roma. 194 pp.

Escobar, I. 2004. Acolchado de suelo con plásticos reflectantes en el cultivo de judía de mata baja en invernadero. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 178 pp.

Fageria, N.K. 2001. Adequate and toxic levels of copper and manganese in upland rice, common bean, corn, soybean, and wheat grown on an Oxisol. Communications in Soil Science and Plant Analysis 32 (9/10): 1659-1676.

Fernández, E.J. and Camacho, F. 2005. Eficiencia en el uso del agua. Extra: 86-89.

Fundación Cajamar. 2009. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería 2008/2009. Informes y monografías 21: 1-51.

García, M.L. 2007. Refrigeración de invernadero: Influencia sobre la Bioproductividad 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. 291 pp.

Gázquez, J.C., López, J.C., Baeza, E., Sáez, M., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Lorenzo, P. 2006. Yield response of a sweet pepper crop to different methods of greenhouse cooling. Acta Horticulturae 719: 507-514.

Gázquez, J.C., Sáez, M., López, J.C., Fernández, M.D., Pérez-Parra, J., Baeza, E. 2007. Eficiencia en el uso del agua de un cultivo de pimiento sometido a tres estrategias de refrigeración. XXV Congreso Nacional de Riegos. Pamplona. 81-82.

Geiger, D.R., Shieh, W.J. 1988. Analysing partitioning of recently fixed and reserve carbon in reproductive *Phaseolus vulgaris* plants. *Plant, Cell and Environment* 11: 777-783.

Geiger, D.R., Shied, W.J., Saluke, R.M. 1989. Carbon partitioning among leaves, fruits and seeds during development of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant physiology* 91: 291-297.

Gómez, K. and Gómez, A. 1984. Statistical procedures for agricultural research. John Wiley and sons. New York. 680pp.

Grange, R.I. and Hand, D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of Horticultural Science* 62(2): 125-134.

Hao, X. 1999. Growth, photosynthesis, biomass partitioning, yield and their relationships in processing snap beans. *Horticultural Science* 34: 478.

Hernández, J., Ortega, B. Montero, J.I., Antón, A., Escobar, I., Soriano, T., Morales, M.I., Quesada, F.M., Castilla, N. 2001. Comportamiento agronómico de invernaderos de cubierta asimétrica y simétrica en un cultivo de judía de enrame. *Acta de Horticultura* 30: 845-851.

Hernández, G. 2009. Valoración radiativa , microclimática y productiva de dos invernaderos con diferente geometría de cubierta (hemicircular y lineal simétrica a dos aguas). Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Almería. 258 pp.

Heuvelink, E. and Dorais, M. 2005. Crip Growth and Yield. In: Tomatoes. Ed: E. Heuvelink. CABI Publising. Cambridge. USA. 85-143.

Hoyos, P., Pérez, R., Molina, S., Tena, P. 2007. Influencia de la cadencia de recolección en la producción y calidad de dos cultivares de judía verde. XXXVII Seminarios de Técnicos y Especialistas en Horticultura 259-280.

INFLUVEC. 1970. La judía: economía, producción y comercialización. Ed. Acribia. Zaragoza. 135 pp.

Jiffon, J.L. and Wolfe, D.W. 2005. High temperature-induced sink limitation alters growth and photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of the American Society of Horticultural Science* 130: 487.

Judez, A. 1991. Notas sobre el diseño de experimentos con aplicación a la investigación con cultivos protegidos. En: López-Gálvez, J., Díaz-Álvarez, J.R. (ed). *Curso Internacional sobre agrotecnia del cultivo en invernaderos*. FIAPA-IFA: 345-410.

López-Gálvez, J. 1990. Productividad de la judía verde sobre enarenado bajo invernadero en Almería. Ed. F.I.A.P.A. Almería. 255 pp.

López-Marín, J., Gálvez, A., Espinosa, M.F., González, A. 2009. Respuesta de un cultivo de pimiento en invernadero a la utilización de diversos sistemas de sombreo. *Acta de Horticultura* 54: 521-526.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., García, M.L., Caparrós, I., Giménez, M. 2003. External greenhouse mobile shading: Effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 609: 181-186.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., García, M.L., Caparrós, I., Coelho, G., Giménez, M. 2004. Climate control in the summer season: A comparative study of external mobile shading and fog system. *Acta Horticulturae* 659: 189-194.

Lorenzo, P., García, M.L., Sánchez- Guerrero, M.C., Medrano, E., Caparros, I., Gimenez, M. 2006. Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. *Acta Horticulture* 719: 471-478.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Alonso, F.J., García, M.L.. 2010. Sombreado. En: *Manejo del clima en el invernadero mediterráneo*. Ed: Sánchez-Guerrero, M.C., Alonso, F.J., Lorenzo, P., Medrano, E. 39-54.

Loveys, B.R., Scheurwater, I., Pons, T.L., Fitter, A.H., Atkin, O.K. 2002. Growth temperatures influences the underlying components of relative growth rate: an investigation using inherently using fast and slow growing species. *Plant, Cell and Environment* 25: 975-987.

Lucas, E.D., Milbourn, G.M., Whitford, P.N. 1976. The translocation of <sup>14</sup>C photosynthate from leaves and pods in *Phaseolus vulgaris*. *Annals of Applied Biology* 83: 285-290.

MAPA 1994. Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Ministerio de agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

MARM 2007. Anuario de Estadística Agroalimentario del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 1190 pp.

MARM 2008. Anuario de Estadística Agroalimentario del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 1150 pp.

MARM 2009. Anuario de Estadística Agroalimentario del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 1190 pp.

Maroto, J.V. 2002. Horticultura herbácea especial. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 514 pp.

Masaya, P. and White, J.M. 1991. Adaptation to photoperiod and temperature. Common beans. A.V. Schoonhoven & O. Voysest (Ed), CIAT. C.A.B. International Oxon: 445-500.

Meca, D.E. y Gázquez, J.C. 2004. Ensayo de cultivares de judía verde de enrame (*Phaseolus vulgaris*) en invernadero. XXXIV Seminarios de Técnicos y Especialistas en Horticultura 185-191.

Meca, D.E. y Gázquez, J.C. 2005. Ensayo de cultivares de judía verde de enrame (*Phaseolus vulgaris*) en invernadero para un ciclo de primavera. XXXV Seminarios de técnicos y especialistas en horticultura 191-199.

Meca, D., López, J.C., Gázquez, J.C., Baeza, E., Pérez-Parra, J., Zaragoza, G. 2006. Evaluation of two cooling systems in parral type greenhouses with pepper crops: low pressure fog system verses whitening. *Acta Horticulturae* 719: 515-519.

Meca, D.E., Gázquez, J.C., Martínez, E.M., Segura, M.D. 2007. Ensayo de cultivares de judía de mata baja en invernadero bajo control biológico. XXXVII Seminarios de técnicos y especialistas en horticultura 251-258.

Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., García, M.L., Caparrós, I., Giménez, M. 2004. Influence of an external greenhouse mobile shading on tomato crop transpiration. *Acta Horticulture* 659: 195-199.

Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Montero, J.I. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae* 105: 163-175.

Möller, M., Tanny, J., Li, Y., Cohen, S. 2004a. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 35-51.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S., Li, Y., Grava, A. 2004b. Water consumption of pepper grown in an insect proof greenhouse. *Acta Horticulturae* 659: 569-575.

Möller, M. and Assouline, S. 2007. Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements. *Irrigation Science* 25: 171-181.

Montero, J.I., Antón, A., Muñoz, P. 2003. Nebulización: Efectos sobre el microclima, producción eficiencia en el uso del agua. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Ed. Fernández, M. Lorenzo, P. Cuadrado, I. Curso Superior de Especialización vol. 7. Almería. 231-243.

Monterosso, V.A. and Wein, H.C. 1990. Flower and pod abscission due to heat stress in beans. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 115: 520.

Peet., M.M., Bravo, A., Wallace, D.H., Ozbun, J.L. 1977. Photosynthesis stomatal resistance and enzyme activities in relation to yield on field-grown dry beans varieties. *Crop Science* 17: 287-293.

Peet, M.M., Willits, D.H., Gardner, R. 1997. Response of ovule development and post-pollen production processes in male-sterile tomatoes of chronic, sub-acute high temperature stress. *Journal of Experimental Botany* 48 (306): 101-111.

Roderick, M.L., Berry, S.L., Noble, I.R., Farquhar, G.D. 1999. A theoretical approach to linking the composition and morphology with the function of leaves. *Functional ecology* 13: 696-710.

Roberts, M.J., Long, S.P., Tieszen, L.L., Beadle, C.L. 1987. Measurement of plant biomass and net primary production. *Techniques in bioproductivity and photosynthesis*, Coombs, J., Hall, D.O. (eds). Pergamon press, Exeter, U.K.

Robitaille, H.A. 1978. Dry matter accumulation patterns in indeterminate *Phaseolus vulgaris* L. cultivars. *Crop Science* 18: 740-743.

Roldán, B., Terren, L., Moldes, G., Rodríguez, J.M. 2001. Ensayo de cultivares de judía verde al aire libre 129-134.

Roldán, B., Terren, L., Pousa, C., Núñez, A. 2004. Evaluación de producción de judía verde en invernadero, con tres sistemas de entutorado. XXXIV Seminarios de técnicos y especialistas en horticultura 177-183.

Romacho, I., Hita, O., Soriano, T., Morales, M.I., Escobar, I., Suárez-Rey, M., Hernández, H., Castilla, N. 2006. The Growth and Yield of Cherry Tomatoes in Net Covered Greenhouses. *Acta Horticulturae* 719: 529-534

Romero-Gámez, M., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N., Soriano, T., Casadesús, J., Antón, A., Montero, J.I. 2008. Efectos de la nebulización sobre el microclima y producción del cultivo de judía verde bajo invernaderos de malla. *Actas de horticultura* 50: 76-82.

Sánchez-Guerrero, M.C., Caparros, I., Lorenzo, P., Medrano, E., García, M.L., Botelho, R. 2006. El sombreado móvil y la dilución de la solución nutritiva en cultivo protegido regado con agua de moderada salinidad. *Acta de Horticultura* 46: 83-86.

Sánchez-Guerrero, M.C., Alonso, F.J., Medrano, E., Lorenzo, P. 2008. Respuesta del cultivo de pimiento a la aplicación de sombreado exterior móvil y fijo en invernadero mediterráneo. *Acta de Horticultura* 50: 108-115.

Sandri, M.A., Andriolo, J.L., Witter, M., Dal Ross, T. 2003. Effect of shading on tomato plants grow under greenhouse. *Horticultura Brasileira* 21(4): 642-645.

Schwarz, D., Klaring, H.P., Van Lersel, M.W., Ingram, K.T. 2002. Growth and photosynthetic response of tomato to nutrient solution concentration at two light levels. *Journal of American Society for Horticultural Science* 127(6): 984-990.

Serrano, Z. 1979. Cultivo de hortalizas en invernadero. *Biblioteca Agrícola Aedos*. 201-212.

Serrano, Z. 1990. Técnicas de invernadero. Ed. PAO. Suministros Gráficos S.A. Sevilla. 644.

Serrano, Z. 1996. Veinte cultivos de hortalizas en invernadero. Ed. Rali S.A. Sevilla. 638.

Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy. 6th ed. USDA. Washington DC, USA.

Stansell, J.R. and Smittle, D.A. 1980. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal American Society of Horticultural Science* 105 (6): 869-873.

Sung, S.S., Xu, D.P., Black, C.C. 1989. Identification of actively filling sucrose sinks. *Plant Physiology* 89: 1117-1121.

Susuki, K., Tsukaguchi, T., Takeda, H., Egawa, Y. 2001. Decrease on pollen stainability of green bean at high temperatures and relationships to heat tolerance. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 126:517.

Tanny, J. 2010. Screen constructions for environmentally sound crop production. 28th International Horticultural Congress (en prensa).

**CAPÍTULO 3.**  
EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL  
GENERADO POR EL CULTIVO BAJO MALLA  
CON Y SIN NEBULIZACIÓN MEDIANTE  
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).  
COMPARACIÓN CON CULTIVO AL AIRE LIBRE

---





# 1. Introducción

## 1.1. Definición del análisis del ciclo de vida (ACV)

La demanda social de una producción más respetuosa con el medio ambiente hace necesario el empleo de tecnologías que contribuyan a la preservación del medio, bajo criterios sostenibles, y permitan la obtención de productos de alta calidad en condiciones de seguridad alimentaria. Por ello, es necesario realizar un análisis objetivo y evaluar los respectivos procesos productivos e impactos ambientales potenciales que éstos ocasionan a lo largo de su ciclo de vida, desde las materias primas inicialmente empleadas hasta el final de los residuos generados. Esta cadena que va “desde el nacimiento hasta la tumba” es lo que se denomina *Ciclo de Vida* de un producto.

El análisis del ciclo de vida, ACV, es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas, producción, transporte y distribución; uso del producto, reutilización y mantenimiento del mismo, y reciclado y disposición del residuo (SETAC, 1993).

La principal función del ACV es la de brindar soporte para tomar las decisiones que se relacionan con productos o servicios y más específicamente, la de conocer las posibles consecuencias ambientales relacionadas con el uso de un producto o con la configuración y utilización de un servicio (Romero Rodríguez, 2003). De esta manera, se pretende detectar los

puntos débiles del proceso y conseguir una selección y mejora de las estructuras, sus equipamientos y de las técnicas de cultivo más respetuosas con el entorno y los recursos naturales.

El desarrollo del ACV se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa. Pero fue a partir de los años ochenta cuando la aplicación del ACV se incrementó. Los primeros trabajos utilizaron este método para producción industrial. El desarrollo del ACV en España tiene sus orígenes a principios de los años noventa. En el año 2002 se crea la *Red Española de ACV*, entre cuyos objetivos se halla el fomento de la cooperación entre los diferentes organismos interesados en la aplicación de dicha herramienta.

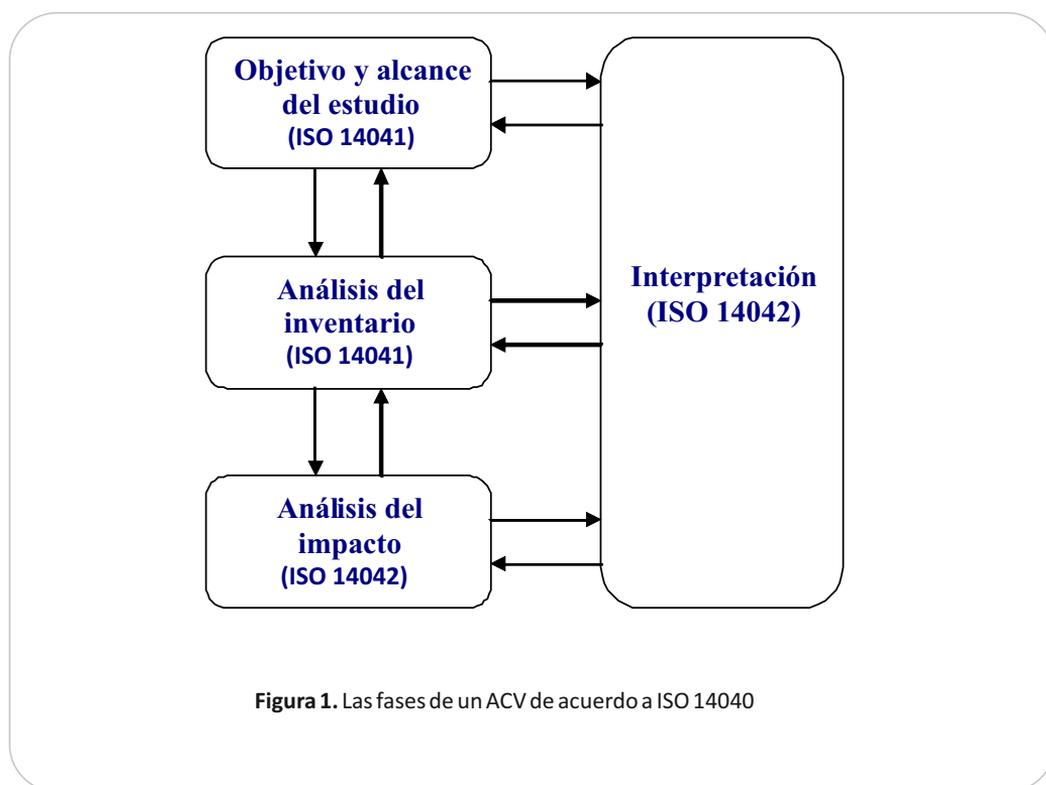
La Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV, formulando, en 1993, el primer código internacional; código de prácticas para el ACV (Code of Practice for Life Cycle Assessment). Posteriormente, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) apoyó este desarrollo para establecer una estructura de trabajo, uniformizar métodos, procedimientos y terminologías.

## 1.2. Metodología

Para poder valorar la calidad ambiental de un producto agrícola deberán establecerse unos parámetros transparentes, cuantificables y objetivos, incluyendo 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. Por tanto, 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 Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la Administración o Gestión Ambiental. Estos estándares incluyen las series ISO 14040 sobre el ACV, que son de carácter voluntario. La norma ISO 14040, 1997 establece que “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040, un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: definición de objetivos y alcance (ISO 14041, 1998), análisis del inventario, ICV (ISO 14041, 1998), evaluación del impacto, AICV (ISO 14042, 2000) e interpretación de resultados (ISO 14043, 2000) (figura 1). Estas fases no son secuenciales, el ACV es una técnica iterativa que permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones. El ACV es, por tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza (Romero Rodríguez, 2003).



**Figura 1.** Las fases de un ACV de acuerdo a ISO 14040

La metodología propuesta tiene en cuenta los procesos de forma global resultando una herramienta muy adecuada, puesto que una buena gestión ambiental implica una acción integrada sobre los posibles daños ambientales. Esta metodología se utiliza principalmente en productos industriales, para evaluar la manipulación de los productos alimentarios y en los procesos agrarios, aunque en este caso la información sobre los indicadores ambientales más adecuados en general, y su aplicación en particular en invernaderos mediterráneos y de interior, es más escasa. Por ello, es necesario una adaptación de esta herramienta (Antón, 2004).

### 1.3. El ACV y la agricultura

Debido a la creciente conciencia ambiental de los consumidores de un gran número de países de todo el mundo, se requiere un conocimiento más profundo sobre los impactos ambientales de las actividades agrícolas habituales (Mourad y col., 2007).

Se espera que la agricultura sea competitiva, para producir alimentos de alta calidad en cantidades suficientes y que sea favorable ambientalmente (Commission of the European Communities, 1999; UN-DSD, 2000). Pero la agricultura implica una explotación del medio natural. Los primeros estudios acerca de la influencia de la agricultura sobre el medio ambiente se inician en 1973 coincidiendo con la crisis energética y se basan en los análisis de la energía utilizada. Entre los diversos trabajos existentes en este campo, cabe destacar la obra de Pimentel (1980) y la aplicación específica a cultivos en invernadero (Stanhill, 1980).

Hay menos trabajos sobre el estudio de ACV para los sistemas agrícolas que para el sistema industrial ya que ésta es un área relativamente nueva de aplicación del ACV. En las aplicaciones del ACV a las producciones agrícolas hay notables diferencias registradas respecto a los sistemas industriales. Por ejemplo, el uso de la tierra es generalmente ignorado por los sistemas industriales, si bien es esencial para los agrícolas. Además, la calidad del suelo puede cambiar debido a los cambios físicos que alteran los ecosistemas y afectan a la biodiversidad y el valor estético del paisaje (Cowell y Clift, 1997). Desde 1995 se han desarrollado diversas acciones para investigar como debería aplicarse el ACV a la producción agrícola.

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. En el ámbito metodológico, destacan las contribuciones de Cowell (1998) en cuanto al establecimiento de pautas para el desarrollo de ACVs en los productos agrarios y de Milà (2003), destacando la importancia del estudio de los factores locales en el ACV de los productos agrícolas.

Tras la adaptación de la metodología para su aplicación en agricultura, diversos estudios lo

han utilizado para comparar diferentes sistemas de producción de cultivos al aire libre, intensivos, orgánicos, integrados y convencionales (Wegener Sleeswijk y col., 1996; Weidema y col., 1996; Cowell, 1998; Mattsson, 1999; Milà, 2003; Martínez-Blanco y col., 2010). Una de las contribuciones más relevantes en la agricultura de ACV fue publicada por Weidema y Meeusen (2000). La agricultura ecológica es un sector en auge, donde también se aplica el ACV; por ejemplo, en Estados Unidos, la agricultura es responsable de casi el 7% de las emisiones totales de gases invernadero (Heller y col., 2008). El sector de alimentos orgánicos ha crecido entre un 15-20% anual durante la última década y los lácteos orgánicos, en particular, han crecido en más del 25% en los últimos años (OTA, 2007). Por tanto, hay una gran necesidad de una evaluación comparativa sistemática del impacto ambiental de la agricultura ecológica con el fin de proporcionar orientaciones para la mejora continua en la sostenibilidad de este sector. Otro gran campo en el que se ha aplicado el ACV es el sector forestal y aprovechamiento de la madera (Richter y Gugerli, 1996; Esser y col., 1998; Higham y Todd, 1998).

En el territorio español diversos grupos de investigación han iniciado la aplicación del ACV en diferentes sectores agrarios: horticultura (IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries), AGA (Grup d'Anàlisi i Gestió Ambiental), IFAPA (Instituto de investigación y Formación Agraria y Pesquera)), citricultura (Universitat Politècnica de Valencia), fruticultura (Universitat Autònoma de Barcelona), etc. El sector de la ganadería y otros ámbitos dentro del sector agrícola también cuentan con diversos grupos de trabajo.

Para evaluar la sostenibilidad del sistema de producción agrícola es necesario tener indicadores adecuados. Los impactos medioambientales del uso del nitrógeno en agricultura han sido analizados en numerosas investigaciones. La mayoría de estas investigaciones se centran en un aspecto medioambiental específico asociado con la agricultura, como las emisiones de óxido nítrico, la lixiviación de nitratos o la volatilización del amoníaco (ECETOC, 1988; Sommer, 1992; ECETOC, 1994; Kroeze, 1994; Bouwman, 1995; Bussink, 1996; Kaiser y col., 1996; etc.). Sin embargo, los sistemas de producción agrícola contribuyen a un amplio rango de impactos medioambientales (ej. cambio climático, acidificación, eutrofización, etc.). Con el fin de analizar y comparar las cargas ambientales relacionadas con los sistemas de producción agrícola, es necesario considerar todos estos impactos ambientales (Brentrup y col., 2004).

Los problemas más graves que produce la práctica agrícola, desde un punto de vista ambiental, los encontramos en la calidad del suelo, su degradación y posible desertización,

especialmente en zonas donde el agua es un bien escaso, como es el caso de España, donde la agricultura de regadío utiliza cerca del 80% del agua (Antón, 2004).

## 1.4. El ACV y la agricultura intensiva protegida

La agricultura intensiva pretende producir el máximo con la menor ocupación posible del suelo, como es el caso del cultivo bajo invernadero donde se emplean técnicas para forzar la producción. En los últimos años se ha producido una expansión de la superficie protegida (acolchados, túneles, invernaderos), a causa de la demanda por parte del consumidor de los países desarrollados de productos frescos y económicos a lo largo de todo el año. La modificación climática que suponen estas estructuras permite proteger y avanzar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar fuera de época (Antón, 2004). El subsector hortícola de invernaderos en España goza de un dinamismo y eficiencia que le ha permitido suministrar a los mercados nacional y exterior (europeo, fundamentalmente) una amplia gama de hortalizas y flores, en condiciones competitivas con la producción procedente de otros países, principalmente de invernaderos sofisticados del norte de Europa.

Aplicaciones de ACV en horticultura bajo invernadero, se han empleado para valorar varias técnicas de cultivo (calefacción, iluminación artificial y fertilización carbónica) (Jolliet, 1993), estudios de nutrición de cultivo (sin suelo, con sustrato y con sustrato y recirculación) (Nienhuis y col., 1996) y efectos ambientales de sistemas de producción (sistemas orgánicos y convencionales) (Van Woerden, 2001). Existen varios trabajos de aplicación en invernaderos de Centro Europa (Jolliet, 1993; Jungbluth y col., 2000) y en invernaderos de tipo comercial mediterráneo (Antón y col., 2004; Soriano y col., 2005). Muñoz y col. (2007) y Núñez y col. (2008), realizaron estudios de impacto medioambiental en producción vegetal bajo invernadero plástico y producción tradicional al aire libre. Existen también trabajos de ACV en cultivo de flor cortada y planta ornamental en invernadero (Russo y col. 2008; Russo y De Lucia, 2008) e incluso para estudiar el impacto de los diferentes plásticos utilizados en cultivo protegido en Estados Unidos (Bos y col., 2008).

En estudios sobre la influencia del cultivo en invernadero en el medio ambiente, predominan los temas relacionados con el consumo de energía, la contaminación de suelos y agua por nitratos, y la influencia de plaguicidas y residuos generados a partir de los plásticos utilizados como materiales de cubierta y sustratos, así como el tratamiento del residuo verde. Al aplicar el ACV a un producto agrícola cultivado, como es nuestro caso, hay que tener en cuenta los efectos

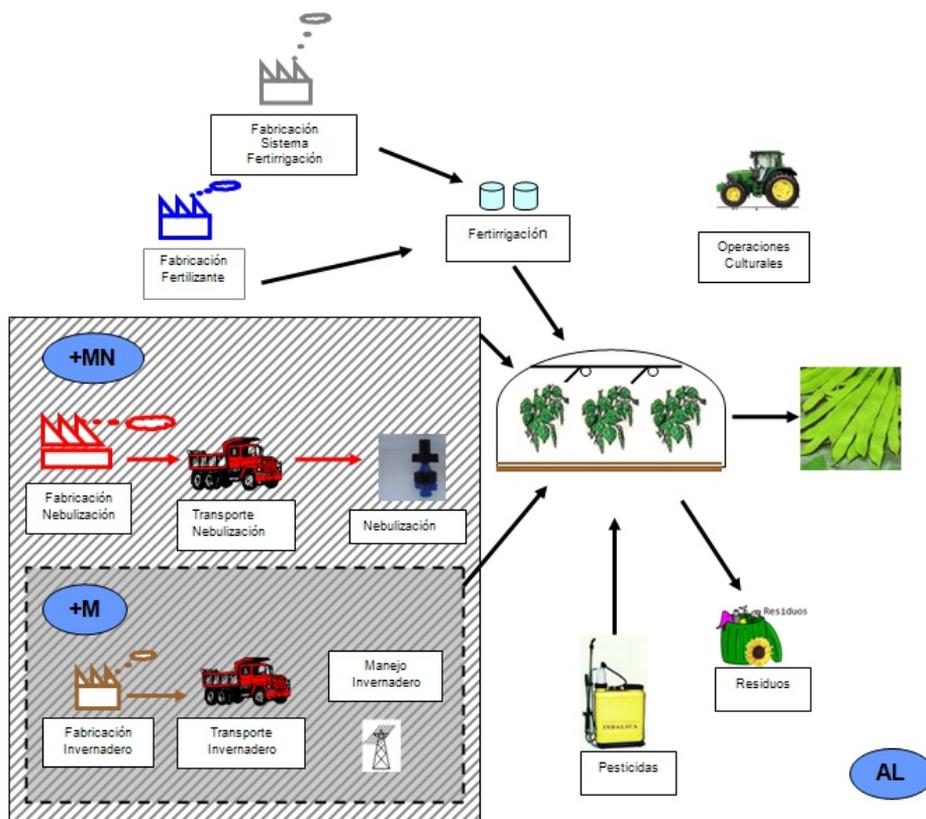
ambientales derivados del proceso de producción, como son: la eutrofización, debido a un alto nivel de nutrientes en el medio acuoso que favorecen un rápido crecimiento de las algas; la acidificación del aire, provocada por la emisión de sustancias ácidas a la atmósfera, suelo y agua disminuyendo el pH del medio y provocando la pérdida de nutrientes del suelo o la movilización de sustancias tóxicas; la contaminación por plaguicidas; la generación de residuos, etc. Pero además, si se aplica a un invernadero, se deben considerar también otros daños ambientales, como los generados por la fabricación y transporte de materias primas de los materiales de construcción necesarios para crear la estructura y construir el invernadero, la energía utilizada en la fabricación y mantenimiento de la maquinaria empleada en la construcción del invernadero y la generación de residuos durante el proceso de producción, así como otros aspectos capaces de producir daños al entorno que formen parte del ciclo de vida del producto considerado. Todos ellos se contabilizan atribuyendo distintos daños ambientales a una unidad funcional.

El cultivo protegido de hortalizas durante el periodo estival en comarcas interiores del área mediterránea se está convirtiendo en una práctica creciente para continuar el suministro de hortalizas de los canales comerciales de los productos obtenidos en los invernaderos plásticos del litoral, canales que quedan desabastecidos durante el periodo estival. Existe una gran falta de información general sobre el manejo de las estructuras de cubierta de malla para cultivo estival, y hasta ahora no había trabajos científicos conocidos sobre la evaluación del impacto ambiental que podría generar (Romero-Gómez y col., 2009a y Romero-Gómez y col., 2009b). En estos trabajos científico-técnicos, se refleja un primer estudio de los impactos ambientales del cultivo de judía verde en invernadero de malla, en invernadero de malla equipado con sistema de nebulización y al aire libre. El cultivo bajo invernadero de malla en primavera y verano genera unas condiciones termohigrométricas subóptimas para las plantas, por lo que cabe emplear sistemas de nebulización que mejoren las condiciones microclimáticas (Romero-Gómez y col., 2008). Muñoz y col. (2007) compararon los impactos ambientales en cultivos de tomate al aire libre y en invernadero de plástico, concluyendo que los tratamientos al aire libre muestran para la mayoría de las categorías, un mayor impacto ambiental debido a la mayor producción obtenida en el invernadero, al haber considerado la producción como unidad funcional en el ACV.

## 1.5. Planteamiento

En esta investigación, se optó por la elección de un cultivo de judía verde de enrame, como una opción viable de los invernaderos de malla en comarcas interiores del sudeste español, económicamente deprimidas. En comarcas de interior, la humidificación puede ser importante para mantener niveles óptimos de déficit de presión de vapor (DPV) y, por tanto, puede ser interesante la instalación de sistemas de nebulización, ya que se pretende cultivar en verano con baja humedad relativa del aire y temperaturas diurnas muy elevadas. Por ser ésta una producción cada vez más extendida, en este trabajo se pretende calcular mediante el ACV las cargas ambientales asociadas al cultivo de judía verde bajo invernadero de malla equipado o no con sistema de nebulización y al aire libre, mediante la identificación y cuantificación de la energía y materiales usados y los residuos emitidos, con el fin de analizar los impactos de éstos y evaluar e implementar posibles mejoras. Para conseguir una mejora de la calidad, se abordan estudios diversos y complementarios, como son la respuesta del cultivo al control climático en invernadero de malla, el ajuste de las necesidades hídricas y de fertilizantes y la evaluación cuantitativa del impacto ambiental de las distintas técnicas empleadas.

En este capítulo, de acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040, se analizan las cargas ambientales asociadas a los tres sistemas de cultivo propuestos, a lo largo de su ciclo de vida (figura 2). Se comparan tres sistemas de producción: invernadero de malla (M), invernadero de malla equipado con sistema de nebulización (MN) y aire libre (AL) (cultivo convencional) en dos ciclos de cultivo de primavera-verano (2008 y 2009). En los siguientes apartados se definen los objetivos, la unidad funcional y el alcance del estudio, exponiéndose los límites, criterios y datos utilizados en la elaboración del inventario, siguiendo las pautas de los inventarios del ciclo de vida (ICV). El análisis de los impactos (AICV), permitirá evaluar la importancia de los daños ambientales potenciales, a partir de los cuales se pueden elaborar recomendaciones destinadas a la mejora, desde el punto de vista ambiental, del cultivo de judía verde en invernadero de malla y al aire libre.



**Figura 2.** Diagrama de procesos considerados en la evaluación ambiental para la producción de judía verde, del sistema de cultivo bajo invernadero de malla (M), cultivo bajo invernadero de malla equipado con sistema de nebulización (MN) y cultivo al aire libre (AL)

## 2. Objetivo

El objetivo de este estudio es la evaluación de los impactos ambientales atribuibles a diferentes sistemas de cultivo de judía verde bajo invernadero de malla y al aire libre a lo largo de su ciclo de vida. El objeto de dicha evaluación es seleccionar y mejorar las estructuras, los equipamientos y las técnicas de cultivo haciéndolas más respetuosas con el entorno y los recursos naturales.

Para ello, se pretende conocer los aspectos más negativos generados en el proceso de producción de cada alternativa y así adoptar técnicas que mejoren ambientalmente el proceso de cultivo de judía verde.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Alcance del estudio

A efectos de analizar un sistema de producción agrícola, el límite del estudio se considera el sistema de cultivo teniendo en cuenta todos los flujos de materia y energía de entrada y salida en él.

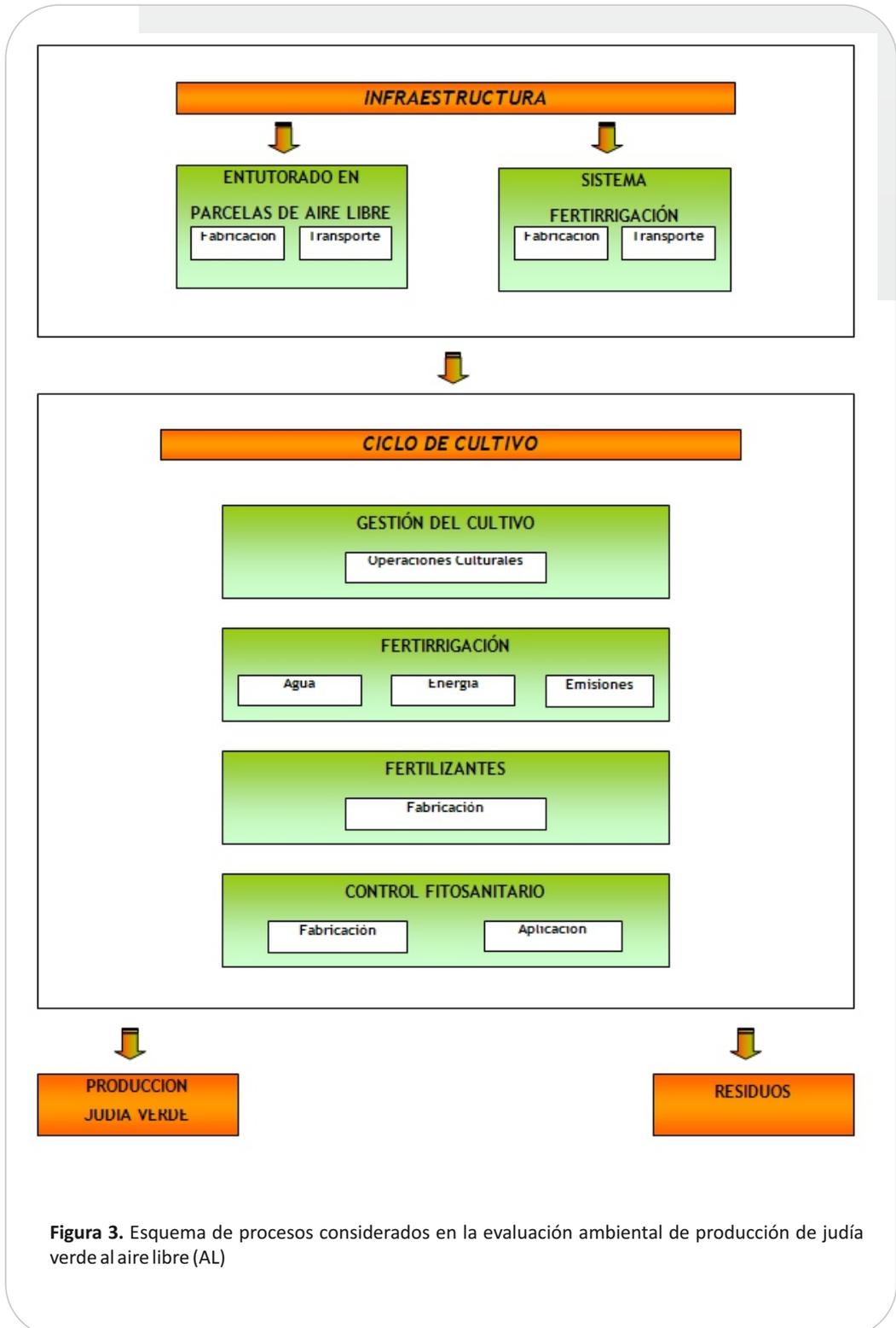
### 3.2. Unidad funcional

El Análisis del Ciclo de Vida requiere de una base objetiva para la comparación, la unidad funcional (UF). La UF viene definida como la principal función del sistema a analizar (ISO-14040, 1997). Se trata de una medida del comportamiento de los elementos funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para cuantificar las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. La UF definida debe ser medible. En el caso de los sistemas agrícolas la principal función es la producción de alimentos (Audsley, 1997), por tanto, se ha considerado como UF la producción comercial de judías verdes (1 Kg de judía verde comercial); todos los datos se normalizan con este valor.

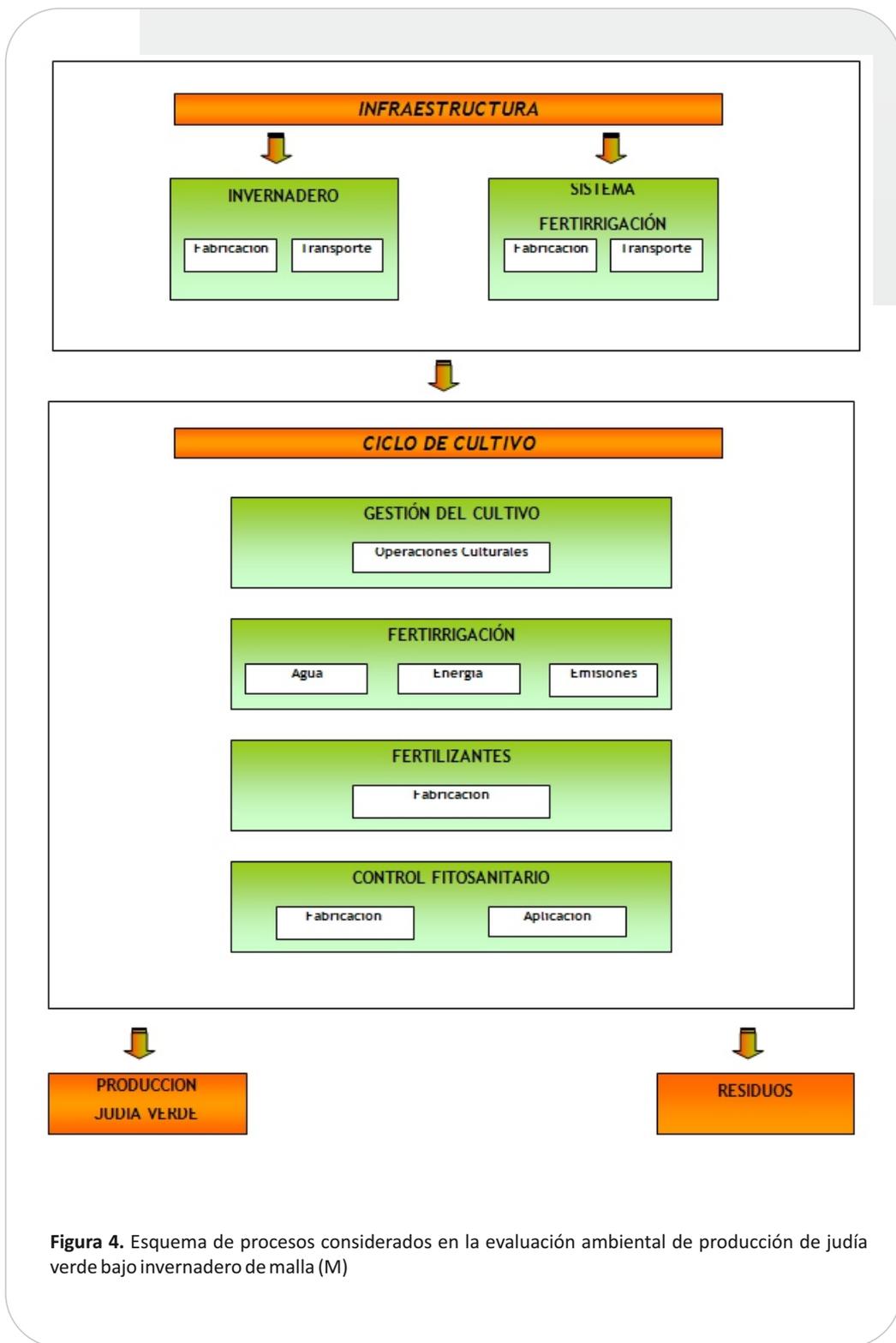
Otros sistemas agrícolas pueden tener más interés por el área que ocupan, como aquellos en que se pretende comparar el comportamiento ambiental de distintas opciones de cultivo (por ejemplo, la comparación de dos invernaderos con diferentes condiciones climáticas, estructura, consumo energético o inversión económica). En estos casos, la UF sería la superficie ocupada.

### 3.3. Sistemas estudiados

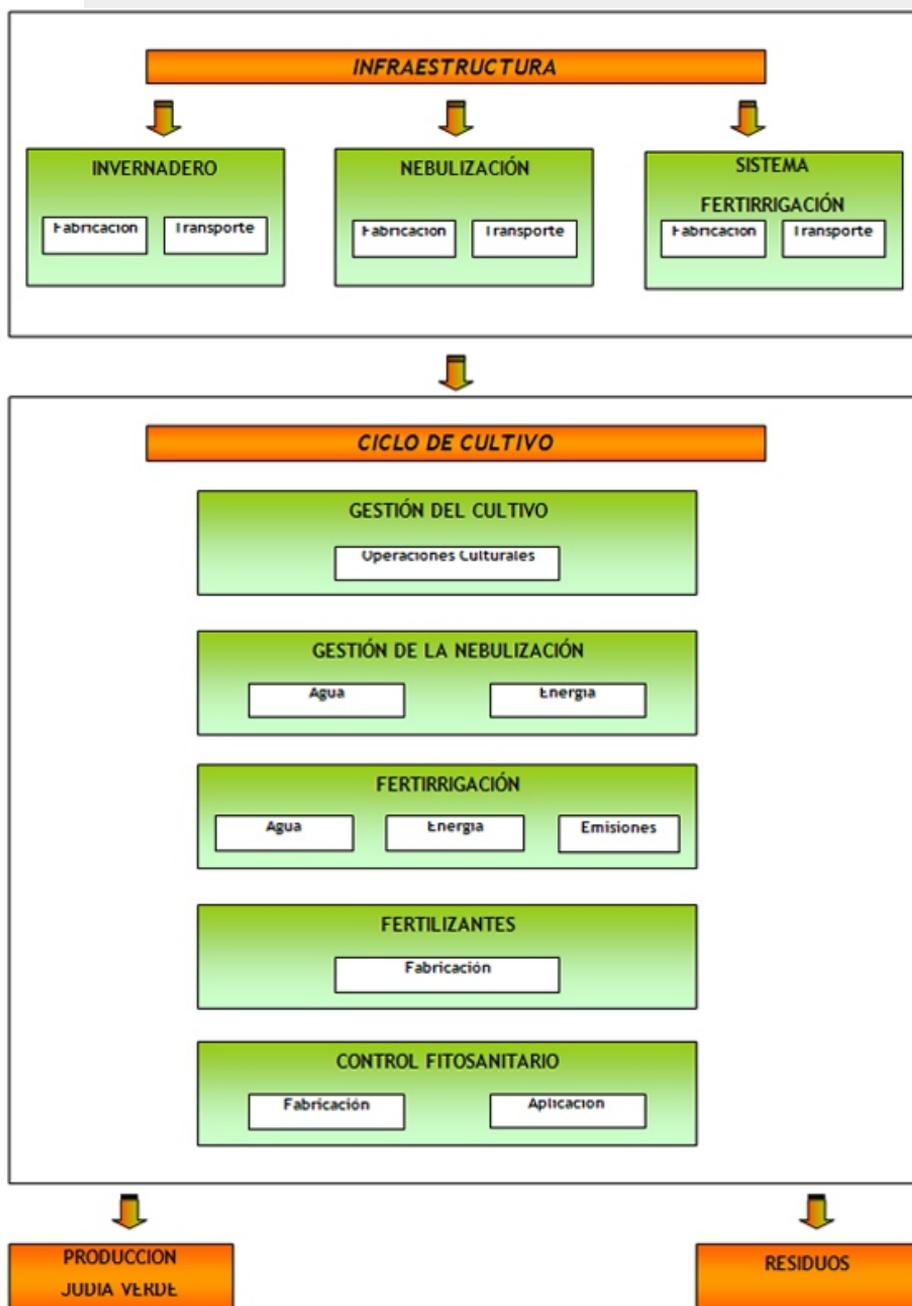
Los sistemas de cultivo aplicados en la producción de judía verde que son objeto de análisis ambiental en este trabajo son: cultivo bajo invernadero de malla (M), cultivo bajo invernadero de malla equipado con sistema de nebulización (MN), y cultivo al aire libre (AL). Las etapas que se han tenido en cuenta en el estudio de ACV, son dos: *la infraestructura*, que incluye: fabricación, transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del umbráculo así como la estructura para entutorado del cultivo de las parcelas al aire libre; fabricación y transporte del material empleado para instalar el sistema de nebulización y fabricación de los materiales propios del sistema de fertirrigación; y el *ciclo de cultivo* donde se incluye el análisis de la maquinaria utilizada para las operaciones culturales, el consumo de agua y energía del sistema de nebulización, la fabricación y aplicación de fitosanitarios y fertilizantes, las emisiones de compuestos contaminantes debidas a la fertilización, así como el agua y energía gastadas por el sistema de riego, y por último, la gestión de los residuos generados incluyendo el transporte hasta el lugar donde serán gestionados. Las figuras 3, 4 y 5 representan los procesos considerados en la evaluación ambiental de producción de judía verde al aire libre (AL), en invernadero de malla (M) y en invernadero de malla con nebulización (MN). La figura 6 esquematiza de forma detallada los sistemas estudiados y los elementos considerados en el inventario para cada uno de ellos.



**Figura 3.** Esquema de procesos considerados en la evaluación ambiental de producción de judía verde al aire libre (AL)



**Figura 4.** Esquema de procesos considerados en la evaluación ambiental de producción de judía verde bajo invernadero de malla (M)



**Figura 5.** Esquema de procesos considerados en la evaluación ambiental de la aplicación de un sistema de nebulización de baja presión en la producción de judía verde bajo invernadero de malla (MN)

### 3.4. Límites de los sistemas

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deben incluirse dentro del ACV, qué cargas ambientales se estudian y a qué nivel de detalle.

#### 3.4.1. *Límites geográficos*

El ICV se realizó a partir de datos locales relativos a las prácticas agrícolas obtenidos en el IFAPA Centro Camino de Purchil, localizado en la Vega de Granada (Latitud: 37° 10' 21"N; Longitud: 3° 38' 10"O; Altitud: 600 m). Si bien, la viabilidad del sistema de cultivo bajo malla aún no está determinada, es posible que pueda extenderse desde los 300-400 m de altitud a los 800 m, desde los meses de mayo hasta noviembre (periodo libre de heladas) limitado por la climatología y la presión de plagas. Los datos obtenidos experimentalmente en este caso, se pueden considerar representativos teniendo en cuenta las técnicas disponibles (Nemecek y Erzinger, 2005).

#### 3.4.2. *Límites temporales*

Los datos de cultivo corresponden a los meses de primavera-verano de los años 2008 y 2009. Por sus características, este trabajo se puede hacer extensivo a numerosas comarcas de interior del Sur Peninsular en cuanto a las etapas de cultivo.

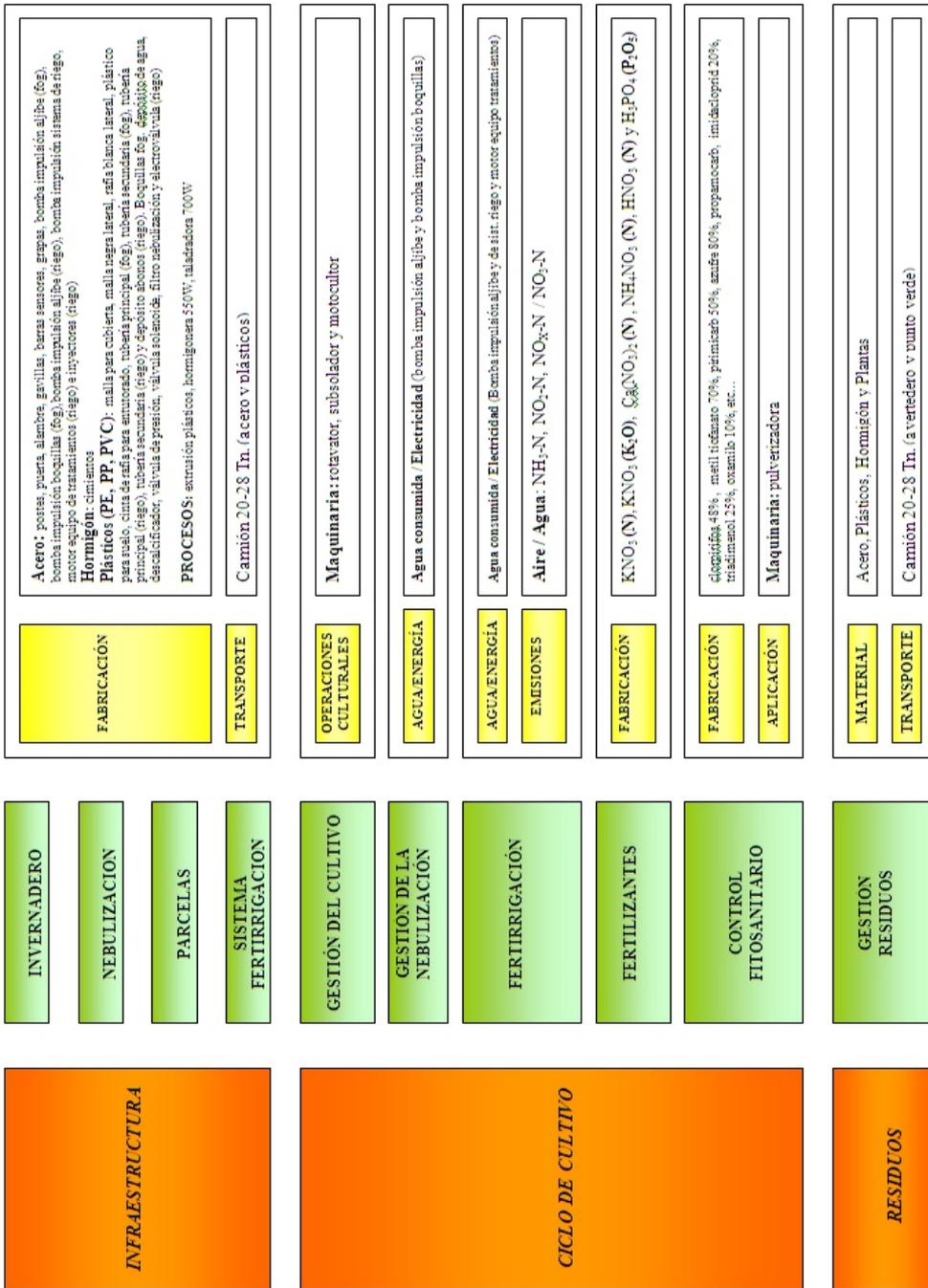


Figura 6. Esquema de los procesos considerados para la evaluación de los sistemas productivos de judía verde en invernadero de malla (M), invernadero de malla con nebulización (MN) y al aire libre (AL), y los elementos considerados en el inventario para cada uno de ellos

### 3.4.3. Aspectos excluidos del ACV

Debido a su naturaleza global, un ACV completo puede resultar muy extenso. Por esta razón, en este trabajo se excluyen algunos aspectos de los límites de los sistemas analizados. Estos aspectos son; el control biológico que se realizó bajo malla, el transporte de fertilizantes y fitosanitarios, los envases y embalajes empleados en el suministro de fertilizantes y del resto de insumos agrícolas, así como la comercialización de la cosecha. Es previsible que los aspectos excluidos tengan un bajo impacto ambiental en relación con los incluidos. Es aconsejable la utilización de ACVs simplificados para detectar los principales problemas ambientales que puedan afectar al cultivo en invernadero (Antón, 2004)

## 3.5. Datos utilizados

Para las características y gestión del invernadero se han utilizado datos de Antón (2004). En la fabricación y consumo de la maquinaria agrícola, de los fertilizantes minerales y los pesticidas y del transporte, se ha tenido en cuenta a Audsley (1997) y la base de datos de *Ecoinvent system process v. 2.0*, 2007 (Tabla1).

La herramienta informática para el análisis de impactos ha sido el programa SimaPro v. 7.1, realizando las fases de clasificación y caracterización que define la norma ISO 14040 (1997), la cual especifica el marco general, principios y necesidades básicas para realizar un estudio de ACV. En la sección Análisis del Inventario se detallan las fuentes utilizadas en la recogida de datos para cada proceso.

**Tabla 1.** Calidad de los datos utilizados en el Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Proceso	Ámbito geográfico	Datos	Procedencia
Gestión del cultivo	Local	2010	Parcelas de cultivo de Granada
	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent
Infraestructura del invernadero, nebulización, parcelas y sistema de fertirrigación	Local	2010	Parcelas de cultivo de Granada Antón (2004)
	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent
Control fitosanitario	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent
Gestión de la nebulización	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent
Emisiones de fertirrigación	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Audsley (1997)
Fertilizantes	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent
Residuos	Europa	Versión v. 2.0, 2007	Ecoinvent

### 3.6. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

En el análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) se cuantificó los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua (las cargas medioambientales) derivados de todos los procesos que están dentro de los tres sistemas de cultivo mencionados anteriormente.

El inventario del ciclo de vida se ha dividido en dos etapas: Infraestructura y Ciclo de cultivo.

### 3.6.1. Infraestructura

Esta etapa comprende las siguientes fases:

- Estructura del invernadero de malla
- Sistema de nebulización
- Estructura de las parcelas al aire libre
- Sistema de fertirrigación

#### 3.6.1.1. Estructura del invernadero de malla

Se trata de una estructura metálica de acero galvanizado, multimodular, tipo raspa y amagado (cubierta a dos aguas) del tipo parral, que sujeta el material de cubierta entre dos redes de alambre (foto1).



**Foto 1.** Invernadero de malla

La tabla 2 recoge las dimensiones del invernadero de estudio. Se trata de una estructura que cubre 960 m<sup>2</sup> de superficie. Es trimodular, con módulos de 8 m de ancho y 40 m de longitud. La distancia entre cubreras es de 8 m y entre postes de 5 m, en sentido longitudinal. La altura de la cubrera es de 4 m y la del canalón es de 3,5 m. Las dimensiones totales son de 24 x 40 m<sup>2</sup>, con la

orientación del eje principal en dirección norte-sur.

La cubierta de la estructura del invernadero se hizo con malla mono-filamento de polietileno (PE) natural blanca-negra de  $9 \times 6$  hilos·cm<sup>-2</sup>. Las bandas de la estructura del invernadero se realizaron con malla negra  $16 \times 10$  hilos·cm<sup>-2</sup> en todo el perímetro y rafia plastificada impermeable al aire. El suelo fue acolchado con rafia negra.

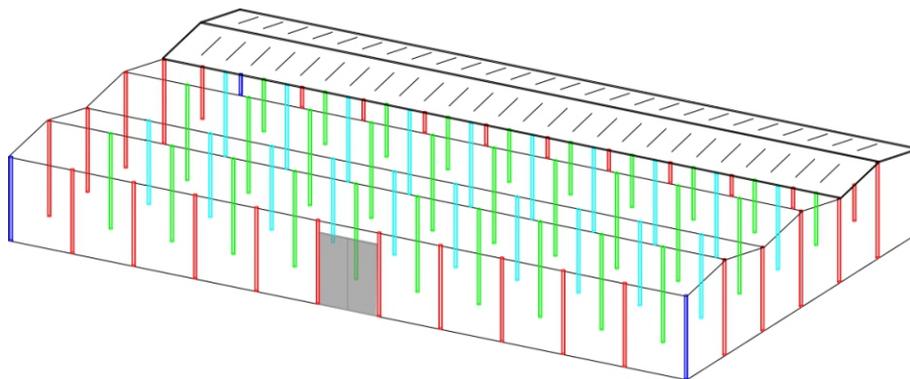
**Tabla 2.** Dimensiones del invernadero de malla

Datos Invernadero	Valor	Unidades
Nº naves	3	
Nº puertas	2	
Anchura nave	8	m
Longitud	40	m
Superficie suelo	960	m <sup>2</sup>
Altura amagado	3,5	m
Altura cumbrera	4	m
Perímetro	128	m
Volumen	3600	m <sup>3</sup>
Superficie de material de cubierta	1427,5	m <sup>2</sup>

La estructura vertical interna está formada por postes metálicos redondos sobre los que se apoya la cubierta (tabla 3). El tejido de cubierta del techo y la cubierta frontal y lateral quedan sujetos por una red de alambres de 3 mm de diámetro. En el interior del invernadero, entre los postes, hay además alambres tensores tanto simples como trenzados. La cimentación está formada por las zapatas de los postes interiores, perimetrales y esquineros con unas dimensiones de 1 m de profundidad y 0,5 m de diámetro. En la construcción del invernadero se ha considerado el consumo energético correspondiente al tiempo de funcionamiento de la hormigonera (550W) y de la taladradora (700W).

**Tabla 3.** Postes sobre los que se apoya la cubierta del invernadero

	Perimetrales	Esquineros	Interiores raspa	Interiores amagado
<b>Longitud (m)</b>	3	3	4	2
<b>Espesor (mm)</b>	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
<b>Diámetro (mm)</b>	0,37	0,37	0,33	0,1
<b>Numero (u)</b>	38	4	27	18



La tabla 4 detalla el material inventariado en peso de los diferentes materiales utilizados en la estructura del invernadero, material de cubierta y anejos como cintas para entutorado y grapas. Igualmente se detalla la vida útil en años considerada para cada material.

**Tabla 4.** Material inventariado correspondiente a la infraestructura de los invernaderos de malla (M y MN)

Concepto	Material	Cantidad (Kg)	Densidad (Kg·m <sup>-3</sup> )	Vida útil (años)
<b>Estructura de invernadero</b>				
Postes, puertas	acero	5170,2	7900	30
Alambres	acero	1460,2	7900	30
Cimientos	hormigón	20,9	2350	20
Grapas	acero	21,6	7900	30
<b>Material de cubierta</b>				
Malla blanca-negra 9x6 (cubierta)	PE	76,3	920	5
Malla negra 16x10 (lateral)	PE	51,8	920	5
Rafia plastificada blanca (lateral)	PE	86,3	920	5
Rafia negra (suelo)	PE	180,2	920	5
<b>Material entutorado</b>				
Cinta rafia	PE	3,3	920	5

Para cada material, se incluyó la extracción y transporte de las materias primas hasta el lugar de producción, además de su fabricación.

La etapa de fabricación, transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del invernadero, se han considerado de acuerdo con el criterio establecido por Audsley (1997) y Antón (2004).

### 3.6.1.2. Sistema de nebulización

En esta fase se ha considerado la fabricación y el transporte de los materiales necesarios para el sistema de nebulización de baja presión al invernadero de malla (tabla 5).

Este sistema de nebulización de baja presión se incorporó al invernadero para caracterizar su efecto refrigerante en el microclima y en el desarrollo del cultivo. Se instalaron 6 líneas portaboquillas, 2 por módulo, separadas 4 m entre sí y a 2 m del canalón. Las boquillas eran de 7 L·h<sup>-1</sup> y estaban separadas 2 m entre sí y dispuestas al tresbolillo con una densidad de 0,13 boquillas·m<sup>-2</sup>. La

altura de instalación fue de 3,5 m. El cabezal para nebulización incluyó una bomba para llenado del depósito, un filtro de malla, un descalcificador, un depósito, una bomba de impulsión de agua a las líneas portaboquillas, un filtro Arkal de 2", una válvula de presión, una válvula solenoide y otros elementos menores. La tubería principal y las tuberías secundarias eran de polietileno (PE), las boquillas de polipropileno (PP) y los demás materiales plásticos de cloruro de polivinilo (PVC). Para cada material, se incluyó la extracción y transporte de las materias primas hasta el lugar de producción, además de su fabricación.

**Tabla 5.** Material inventariado correspondiente al equipo del sistema de nebulización de baja presión del invernadero de malla (MN)

Elemento	Material	Cantidad (Kg)
Bomba impulsión aljibe (2kW)	acero	20,0
Bomba impulsión boquillas (1,1kW)	acero	15,5
Boquillas	PP	1,2
Tubería principal	PE	2,8
Tubería secundaria	PE	13,9
Depósito agua	PVC	19,9
Descalcificador	PVC	11,6
Válvula de presión	PVC	0,5
Válvula solenoide	PVC	0,1
Filtro nebulización	PVC	0,4

### 3.6.1.3. Estructura de la parcela al aire libre

El estudio al aire libre tuvo lugar en una parcela de 494 m<sup>2</sup>, dotada de los postes y alambres necesarios para entutorar el cultivo (foto 2). La estructura se realizó con postes y alambres y no con cañas o mallas (métodos tradicionales), con objeto de que el entutorado fuera similar al del invernadero y la comparación climática y agronómica, lo más objetiva posible. Desde el punto de vista ambiental, el entutorado elegido en las parcelas al aire libre, tendrá un impacto superior que el entutorado tradicional.



**Foto 2.** Estructura parcela aire libre

La estructura vertical estaba formada por postes metálicos redondos de 3 m de longitud y 0,14 m de diámetro entre los cuales se instaló una red de alambres de 2,5 mm de espesor. El suelo fue acolchado con rafia negra. En la construcción de las parcelas se consideró el consumo energético correspondiente al uso de la taladradora (700W).

**Tabla 6.** Material inventariado correspondiente a la estructura de las parcelas al aire libre (AL)

Elemento	Material	Cantidad (Kg)
Postes	acero	1562,8
Alambres	acero	80,4
Grapas	acero	10,9
Rafia negra (suelo)	PE	92,0
Cinta rafia (entutorado)	PE	1,8

### 3.6.1.4. Sistema de fertirrigación

El riego fue por goteo, con emisores en línea, tanto en el invernadero como al aire libre. En esta fase se tuvieron en cuenta los materiales empleados en la fabricación de los elementos necesarios en el sistema de distribución de riego (bombas, inyectoros, tuberías...) para los tres sistemas de cultivo estudiados (tabla 7), así como el transporte de todos ellos hasta el escenario de cultivo.

**Tabla 7.** Material utilizado en el sistema de fertirrigación para los sistemas de cultivo bajo invernadero de malla (M), bajo invernadero de malla con nebulización (MN) y aire libre (AL)

Elemento	Material	Cantidad (Kg)
Bomba impulsión aljibe (2kW)	acero	20,0
Bomba impulsión sistema riego (2,2kW)	acero	20,0
Inyectoros	acero	1,0
Tuberías terciarias	PE	9,1
Tuberías laterales	PE	88,8
Depósitos abonos	PE	194,8
Electroválvulas	PVC	1,0

Para todos los sistemas de cultivo, en la etapa de infraestructura se consideró el transporte de los materiales a la finca desde sus lugares de origen: Almería-Granada (160 Km), Motril-Granada (65 Km), Barcelona-Granada (890 Km), según consulta en mapas interactivos (Vía Michelin, google maps), en camiones de 20-28 toneladas (modelo de transporte incluido en las bases de datos de Ecoinvent), ida con carga y vuelta vacío. Las cargas ambientales se distribuyeron entre el peso y la vida útil de los diferentes materiales que componen la infraestructura.

### 3.6.2. Ciclo de cultivo

El cultivo de judía verde, variedad "Festival", se realizó en ciclo de primavera-verano de los años 2008 y 2009. Durante el ciclo 2008 hubo un problema en el sistema de riego al aire libre por lo que el cultivo sufrió daños a los 109 días de la siembra de los que no se pudo

recuperar. En el ciclo 2009 se registraron temperaturas muy elevadas (próximas a 40 °C) durante 30 días (6 horas al día aproximadamente), siendo la producción comercial inferior en este ciclo. En la tabla 8, se detallan estos y otros datos considerados en el inventario de la etapa de cultivo.

**Tabla 8.** Datos de cultivo de los ciclos primavera-verano 2008 y 2009 para los sistemas de cultivo bajo invernadero de malla (M), bajo invernadero de malla con nebulización (MN) y aire libre (AL)

Concepto	Ciclo 2008			Ciclo 2009		
	M	MN	AL	M	MN	AL
Densidad de plantación (pl·m <sup>-2</sup> )	21,33	21,33	21,33	21,33	21,33	21,33
Duración del cultivo (días)	164	164	109	135	135	135
Producción comercial (kg·m <sup>-2</sup> )	6,78	8,64	2,97	3,06	3,59	0,91

La etapa de cultivo comprende las siguientes fases:

- Fertilizantes y Fertirrigación
- Gestión de la nebulización
- Gestión del cultivo
- Control fitosanitario
- Residuos

### 3.6.2.1. Fertilizantes y fertirrigación

Los datos de inventario para la fabricación de fertilizantes proceden de los procesos inventariados en la base de datos Ecoinvent (Versión v. 2.0, 2007) incluidos en el programa Simapro.

Las dosis de fertilizante utilizadas por superficie, mostradas en la tabla 9, se calcularon para un cultivo de judía en suelo (Casas, 1999). La solución nutritiva fue la misma para todos los sistemas de cultivo en los dos ciclos; las diferencias en el consumo de nutrientes entre sistemas se deben a diferentes aplicaciones de agua por las diferentes longitudes de ciclo y las diferencias en consumo hídrico entre sistemas. Estas se realizaron en función del contenido volumétrico de humedad en suelo a 10 cm de profundidad registrado mediante sensores de humedad ECH2O EC-5 (Decagon Devices) y permitiendo un agotamiento de agua del suelo del 30% como criterio de riego (Cuenca, 1989).

**Tabla 9.** Fertilizantes aportados en el cultivo de judía verde de los ciclos primavera-verano 2008 y 2009 para los sistemas de cultivo bajo invernadero de malla (M), bajo invernadero de malla con nebulización (MN) y aire libre (AL)

Fertilizante	Compuesto activo	CICLO 2008		CICLO 2009	
		M y MN (g·m <sup>-2</sup> )	AL (g·m <sup>-2</sup> )	M y MN (g·m <sup>-2</sup> )	AL (g·m <sup>-2</sup> )
Ácido nítrico NO <sub>3</sub> H	N	6,29	6,53	4,12	5,27
Ácido fosfórico PO <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25,4	27,1	9,8	18,1
Nitrato potásico KNO <sub>3</sub>	N	0,16	0,17	0,11	0,14
Nitrato potásico KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	0,58	0,59	0,38	0,48
Nitrato cálcico Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	N	0,06	0,06	0,04	0,05
Nitrato amónico NO <sub>4</sub> (NO) <sub>3</sub>	N	0,06	0,06	0,04	0,05

En los sistemas bajo invernadero se aportó la misma cantidad de fertilizantes, pues el tiempo de funcionamiento de riego fue el mismo en ambos casos.

En el manejo de la fertirrigación, se consideraron los procesos de consumo de energía en el funcionamiento de las bombas de impulsión, el consumo de agua y las emisiones producidas.

El agua que se utilizó para el riego de los cultivos al aire libre y en invernadero fue bombeada de un aljibe situado en la misma finca experimental, mediante una bomba de extracción de 2 kW de potencia. La bomba de impulsión del sistema de riego fue de 2,2 kW. El consumo hídrico por tratamiento y año viene descrito en el capítulo anterior.

A efectos de análisis de los impactos, la emisión de nutrientes a causa de los fertilizantes tendrá importancia en las categorías en que se contabilizan las emisiones de NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, al aire y NO<sub>3</sub> al agua, según Audsley (1997). No se contabilizaron las emisiones de P y de metales pesados.

El cálculo de las diferentes emisiones (tabla 10) se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

-Emisión de amoníaco (NH<sub>3</sub>) al aire:

El amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) contenido en los fertilizantes puede ser convertido en NH<sub>3</sub> y emitido al aire. Dicha emisión se calcula como porcentaje del nitrógeno aplicado pudiendo variar en función del compuesto químico y del pH del suelo. Para el cálculo de las emisiones de amonio Audsley (1997)

recomienda un valor promedio de 2,0% de los fertilizantes sintéticos aplicados.

-Emisión de monóxido de dinitrógeno ( $N_2O$ ) al aire:

Para el cálculo de las emisiones de  $N_2O$  en la bibliografía se recogen diferentes métodos. Las conclusiones del grupo de trabajo del ciclo de nitrógeno en LCI (Bentrup y Kusters, 2000; Weidema y Meeusen, 2000) basándose en la guía publicada por Climate Change Indicator Panel, (IPCC, 1997) aconsejan la utilización del factor 1,25% del N aportado sustrayendo el consumido por la planta.

-Emisión de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) al aire:

Del total de emisiones de  $N_2O$ , se considerará que un 10% serán emisiones de  $NO_x$  (Audsley 1997).

-Lixiviación de nitratos ( $NO_3$ ) al agua:

El cálculo de la fracción de  $NO_3$  que se pierde por lixiviación resulta muy complejo por los numerosos factores que intervienen (época del año, gestión del riego, características del suelo, etc.) (Antón, 2004). Para el cálculo de la lixiviación, y adaptando el método de Audsley (1997) a las emisiones anteriores, se considera que del nitrógeno aportado con la fertilización, y una vez descontado el que se pierde por emisión de amonio, parte es asimilado por el cultivo y parte es retenido en el suelo.

No se produjeron pérdidas de agua por drenaje profundo. Al no desplazarse los nitratos con el agua de drenaje, las emisiones de nitratos al agua fueron nulas.

**Tabla 10.** Emisiones de N consideradas en el cultivo de judía verde en los ciclos primavera-verano 2008 y 2009 para los sistemas de cultivo bajo invernadero de malla (M), bajo invernadero de malla con nebulización (MN) y aire libre (AL)

Emisiones	CICLO 2008		CICLO 2009	
	M y MN ( $g \cdot m^{-2}$ )	AL ( $g \cdot m^{-2}$ )	M y MN ( $g \cdot m^{-2}$ )	AL ( $g \cdot m^{-2}$ )
$NH_3-N^{(1)}$	0,132	0,137	0,086	0,111
$NO_2-N^{(2)}$	0,082	0,085	0,054	0,069
$NO_x-N^{(1)}$	0,008	0,009	0,005	0,007
$NO_3-N^{(1)}$	0	0	0	0

<sup>(1)</sup>Audsley, 1997

<sup>(2)</sup>IPCC, 1997

### 3.6.2.2. Gestión de la nebulización

En el manejo de la nebulización, se consideraron los procesos de consumo de energía en el funcionamiento de las bombas de impulsión y el consumo de agua.

El agua que se utilizó para el llenado del depósito fue bombeada de un pozo situado en la misma finca experimental, mediante una bomba de 2 kW de potencia. La bomba de impulsión de agua a las líneas portaboquillas fue de 1,1 kW. La energía consumida en el funcionamiento de las bombas y los consumos de agua medidos, se muestran en la tabla 11. En ella se reflejan los tiempos de funcionamiento totales en horas, el consumo energético expresado en MJ y la cantidad de agua total consumida en el sistema de nebulización en  $L \cdot m^{-2}$ , durante los ciclos 2008 y 2009.

**Tabla 11.** Tiempo de funcionamiento, energía consumida por las bombas de impulsión y agua consumida por el sistema de nebulización de baja presión utilizado en el cultivo de judía verde en los ciclos primavera-verano 2008 y 2009 en el invernadero de malla

	Tiempo (horas)	Energía (MJ)	Caudal ( $L \cdot m^{-2}$ )
Ciclo 2008	188,2	769,3	174,5
Ciclo 2009	242,9	985,8	229,9

### 3.6.2.3. Gestión del cultivo

Las operaciones culturales incluyen todas las labores de campo realizadas para la producción de judía verde. En las operaciones culturales se emplearon vehículos y utensilios agrícolas que consumen energía y recursos y emiten sustancias contaminantes. Fundamentalmente fueron las labores preparatorias del terreno: el laboreo (subsolador y rotavator, ambos con tractor de cadenas) y la formación de mesetas de siembra (motocultor). El impacto ambiental de estos procesos se incluyó dentro de los límites de los sistemas estudiados.

Para la obtención de los datos de inventario de las entradas de materiales y energía y las salidas de sustancias contaminantes de las operaciones culturales, se adaptaron los procesos inventariados en Ecoinvent incluidos en el programa Simapro, al tipo y peso de la maquinaria utilizada, siguiendo los factores propuestos por los autores de Ecoinvent.

### 3.6.2.4. Control fitosanitario

El sistema constituido por los tratamientos fitosanitarios presentó una gran variabilidad espacial y temporal. Dependiendo del sistema de cultivo y de la campaña, los tratamientos variaron en función de las enfermedades y las plagas presentes. En esta fase, se incluyeron la extracción de las materias primas, el consumo de energía y combustible para la fabricación del producto fitosanitario y la aplicación del mismo. Los datos de inventario para esta fase proceden de los procesos inventariados en la base de datos Ecoinvent incluidos en el programa Simapro. Debido a la falta de información y falta de acuerdo respecto a la emisión de pesticidas, el análisis de toxicidad de pesticidas no se ha tenido en cuenta en este trabajo.

En el invernadero se llevó a cabo un control integrado de plagas, a diferencia del cultivo al aire libre, en el que se empleó control químico convencional, habitual de los agricultores de la zona. Existen por tanto diferencias entre los dos sistemas de cultivo estudiados, siendo mayor el número de tratamientos fitosanitarios en el cultivo al aire libre. Las tablas 12 y 13 muestran las materias activas y las dosis por superficie de cultivo de los plaguicidas empleados en los sistemas de cultivo en invernadero y al aire libre. Para la aplicación de los diferentes plaguicidas empleados se utilizó una cuba pulverizadora adaptada a un tractor, tanto para los tratamientos foliares como en el cuello de la planta.

La cantidad de azufre añadida en el ciclo 2008 es superior que en 2009, debido a una mayor presencia de plagas, sobretodo araña roja, empleando azufre mojable como principal acaricida. En el ciclo 2009, el control de plagas fue más exhaustivo y el tratamiento con azufre mojable fue menor, utilizando como acaricida otras materias activas (abamectina y spiromesifen) y sustancias naturales como algas, aceites y jabón.

**Tabla 12.** Plaguicidas y dosis utilizadas por superficie en los sistemas de cultivo bajo invernadero de malla (M) y bajo invernadero de malla con nebulización (MN) durante los ciclos 2008 y 2009, bajo control integrado

Materia activa	Familia	Tipo	Dosis 2008 kg · ha <sup>-1</sup>	Dosis 2009 kg · ha <sup>-1</sup>
azufre mojable 80% p/p	azufre	acaricida, fungicida	4,750	0,663
abamectina 1,8% p/v	aver-mectina	acaricida, insecticida	0,075	0,035
pirimicarb 50% WG	carbamato	insecticida	0,781	
flufenoxuron 10% p/v	acrilurea	acaricida, insecticida	0,417	
azufre micronizado	azufre	acaricida, fungicida	0,021	
piretrinas 4% + PBO 16% p/v	piretrina	insecticida		0,417
spiromesifen 24%	acido tetrónico	acaricida, insecticida		0,450

**Tabla 13.** Plaguicidas y dosis utilizadas por ha en el sistema de cultivo al aire libre (AL) durante los ciclos 2008 y 2009, bajo control químico convencional

Materia activa	Familia	Tipo	Dosis 2008 kg · ha <sup>-1</sup>	Dosis 2009 kg · ha <sup>-1</sup>
clorpirifos 48% p/v	organofosfato	insecticida	2,040	1,943
azufre mojable 80% p/p	azufre	acaricida, fungicida	1,862	0,093
propamocarb 60,5% p/v	carbamato	fungicida	11,933	9,620
abamectina 1,8% p/v	aver-mectina	acaricida, insecticida	0,066	0,067
imidacloprid 20% p/v	neonicotinoides	insecticida	0,789	0,638
azufre micronizado	azufre	acaricida, fungicida	0,039	
cipermetrina 10% p/v	piretroides	insecticida	0,304	
clorpirifos 5% GR	organofosfato	insecticida	0,759	
pirimicarb 50% WG	carbamato	insecticida	0,506	
oxamilo 10% p/v	carbamato	insecticida		0,061
metil tiofanato 70% WG	organofosfato	fungicida		2,267
triadimenol 25%	triazol	fungicida		0,127
piretrinas 4% + PBO 16% p/v	piretrina	insecticida		0,002
spiromesifen 24%	acido tetronico	acaricida, insecticida		0,002

### 3.6.2.5. Residuos

En esta fase se considera la gestión y transporte de materiales plásticos y acero a plantas de reciclaje y residuos verdes y hormigón a vertedero.

Para cada material plástico (PE, PP y PVC) y para el acero, elementos constituyentes de la estructura del invernadero, del sistema de nebulización y del sistema de fertirrigación, se tiene en cuenta la parte proporcional de la gestión de los residuos que se lleva a cabo al final de su vida útil. Estos materiales se destinan a una planta de reciclaje (punto verde) situada en el término municipal de Granada a unos 4 Km de distancia, la planta de reciclaje más cercana a la zona de estudio (Vía Michelín). Para el transporte de los materiales se consideran camiones de 20-28 toneladas (modelo de transporte incluido en las bases de datos de Ecoinvent).

El hormigón empleado en la estructura del invernadero y los residuos orgánicos resultantes del cultivo en invernadero y al aire libre, se transportan al vertedero de Granada más cercano, a 20 Km (Vía Michelín). En este caso no hay reciclaje de ningún componente y los residuos son transportados en camiones de 20-28 toneladas hasta el vertedero.

### 3.7. Análisis del impacto del ciclo de vida (AICV)

Siguiendo la metodología propia de los ACVs se han analizado las cargas ambientales bajo los tres sistemas estudiados. La etapa de análisis de impactos incluye las fases de clasificación y caracterización de las entradas y salidas del sistema recogidas en el inventario.

En este estudio las categorías de impacto seleccionadas son: agotamiento de los recursos abióticos, AR (Kg Sb eq.); acidificación del aire, AI (Kg SO<sub>2</sub> eq.); eutrofización, EI (Kg PO<sub>4</sub><sup>-2</sup> eq.); calentamiento global, GWP (Kg CO<sub>2</sub> eq.); degradación del ozono estratosférico, ODP (Kg CFC-11 eq.); toxicidad humana HT (Kg 1,4-DB eq.) y oxidación fotoquímica PO, (Kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) (Tabla 15). El análisis de impactos se ha llevado a cabo mediante el programa informático SimaPro v. 7.1, que identifica y clasifica las diferentes cargas ambientales y pondera su importancia dentro de las diferentes categorías de impacto consideradas. El método de evaluación de impactos utilizado es el CML 2 baseline 2000, Versión 2.04 (Guinée y col., 2002).

**Tabla 15.** Categorías de impacto ambiental y unidades de medida de cada categoría

Categorías de impacto	Acrónimo	Unidades de medida
Agotamiento de recursos abióticos	AR	Kg Sb eq.
Acidificación	AI	Kg SO <sub>2</sub> eq.
Eutrofización	EI	Kg PO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> eq.
Calentamiento global	GWP	Kg CO <sub>2</sub> eq.
Degradación del ozono estratosférico	ODP	Kg CFC-11 eq.
Toxicidad humana	HT	Kg 1,4-DB eq.
Oxidación fotoquímica	PO	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>

#### 3.7.1. Agotamiento de recursos abióticos (AR)

Se puede definir como la disminución de la disponibilidad de recursos naturales. Se incluyen en esta categoría recursos abióticos y energía, excluyéndose los bióticos e impactos

asociados tales como pérdida de biodiversidad o extinción de especies.

$$AR = \sum_i F_i \times m_i$$

Ecuación 1

donde AR es el indicador de agotamiento de recursos abióticos,  $m_i$  es la cantidad del recurso utilizado, en Kg, m<sup>3</sup> o MJ, y  $F_i$  es el factor de caracterización de este recurso.

Posteriormente Guinée y col., (2001) recomendó tener en cuenta además de las reservas, el ratio de disminución o reducción del recurso calculado mediante el factor de agotamiento abiótico, ADF (Kg eq. Sb·Kg<sup>-1</sup>).

$$AR = \sum_i ADF_i \times m_i$$

Ecuación 2

expresándose AR en Kg equivalentes de antimonio, como recurso referencia, y siendo ADF igual a:

$$ADF_i = \frac{DR_i}{R_i^2} \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$$

Ecuación 3

donde  $R_i$  es la reserva del recurso  $i$  en kg,  $DR_i$  es la disminución de  $R_i$  en Kg·a<sup>-1</sup> y  $R_{ref}$  (Kg) es la reserva de antimonio como recurso de referencia y  $DR_{ref}$  en Kg·a<sup>-1</sup> es la disminución de  $R_{ref}$ , a son los años que se dispondrá del recurso.

### 3.7.2. Acidificación (AI)

Consiste en la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmósfera, en el suelo y en el agua, dónde puede variar la acidez del medio afectando a la flora y fauna que habita en él, produciendo deforestación, y que además puede afectar a los materiales de la construcción. Las principales sustancias que contribuyen en esta categoría son SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y NH<sub>x</sub>. Siguiendo el criterio establecido en Guinée y col., (2001) para el cálculo de los valores de esta categoría se utiliza la siguiente fórmula:

$$AI = \sum_i AP_i \times m_i$$

Ecuación 4

expresándose AI en kg equivalentes de SO<sub>2</sub>,  $m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  expresada en kg, y siendo el factor de caracterización AP igual a:

$$AP_i = \frac{\eta_i}{\eta_{SO_2}}$$

Ecuación 5

donde  $\eta_i$ , mol·kg<sup>-1</sup>, representa el número de iones H<sup>+</sup> que pueden ser potencialmente producidos por la sustancia  $i$  y  $\eta_{SO_2}$  el número de iones H<sup>+</sup> producidos por Kg de SO<sub>2</sub>.

### 3.7.3. Eutrofización (EI)

En esta categoría se incluyen los impactos debidos a un alto nivel de los macronutrientes nitrógeno y fósforo. Su incremento puede representar un aumento de la producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos. Un aumento de las algas en los ecosistemas acuáticos producirá una disminución del contenido de oxígeno, debido a que la descomposición de dicha biomasa consumirá oxígeno medido como DBO (demanda bioquímica de oxígeno). Este consumo de oxígeno puede conducir a alcanzar unas condiciones anaerobias que provoquen la descomposición causada por bacterias anaeróbicas liberando CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub>. En último término desaparece cualquier tipo de vida aeróbica. El proceso de eutrofización aumenta en verano.

La eutrofización causada por N y P (medido como O<sub>2</sub>) es cuantificada y sumada para el cálculo de su contribución potencial a la formación de biomasa. Los potenciales de eutrofización, EP, son utilizados como factor de caracterización para calcular el indicador total para dicha categoría, EI.

$$EI = \sum_i EP_i \times m_i$$

Ecuación 6

donde  $m_i$  es la masa en kg de la sustancia  $i$  emitida al aire, agua o suelo. El total se expresa como Kg de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. El cálculo de EP se realiza según la ecuación:

$$EP_i = \frac{\frac{v_i}{M_i} \times \frac{N_{O_2}}{A_e}}{\frac{1}{M_{PO_4^{3-}}} \times \frac{N_{O_2}}{A_p}}$$

Ecuación 7

donde  $i$  es el número de moles de N o P en una molécula del compuesto  $i$ ,  $M$  es la masa molecular ( $\text{Kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $N_{O_2}$  es el número de moles de  $O_2$  consumidos durante la degradación de las algas,  $A_e$  es el número de moles N o P contenidos en una molécula de algas. Los valores correspondientes al  $PO_4^{3-}$  se incluyen en el denominador. Se toma la composición de la alga "Redfield"  $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$  asumiéndose ésta como la composición media de los organismos acuáticos (Guinée y col., 2001). El oxígeno requerido para su degradación se mide en forma de DQO (demanda química de oxígeno), asumiéndose que un mol de biomasa precisa de 138 moles de  $O_2$  para su degradación.

### 3.7.4. Calentamiento global (GWP)

La tierra absorbe la radiación del sol. Esta energía es redistribuida por la atmósfera y los océanos y retornada en forma de radiación de infrarrojo térmico. Parte de esta radiación es absorbida por los gases existentes en la atmósfera provocando el calentamiento del planeta, a este fenómeno se denomina efecto invernadero. Estos gases son principalmente el vapor de agua y el  $CO_2$  y otros gases como  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $CFC_s$  (clorofluorocarbonados). La acción humana ha provocado un incremento de las emisiones de estos gases, lo que lleva o puede llevar a un sobrecalentamiento del planeta y, por lo tanto, a una alteración de sus condiciones.

El indicador que sirve para evaluar este impacto se expresará como GE, (Efecto Invernadero). Su medida se hace relativa respecto al efecto producido por un Kg de  $CO_2$  y se calcula mediante la ecuación:

$$GE = \sum_i GWP_i \times m_i$$

Ecuación 8

donde  $m_i$  es la masa de la sustancia  $i$  expresada en Kg y GWP es el potencial de calentamiento global, un factor desarrollado para comparar las emisiones de diferentes gases invernaderos. Se define como la relación entre la contribución a la absorción de calor resultante de la emisión de 1 Kg de un gas con efecto invernadero y la emisión equivalente de  $CO_2$  a lo largo de un tiempo  $T$  (100 años):

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

Ecuación 9

donde  $a_i$  es el calentamiento producido por el aumento de la concentración de un gas  $i$ ,  $W \cdot m^{-2} \cdot Kg^{-1}$  y  $c_i(t)$  es la concentración del gas  $i$  en el tiempo  $t$ ,  $Kg \cdot m^{-3}$ . Los valores correspondientes al  $CO_2$  se incluyen en el denominador.

### 3.7.5. Degradación del ozono estratosférico (ODP)

La capa de ozono está presente en la estratosfera y actúa como filtro absorbiendo la radiación ultravioleta (UV). La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la cantidad de radiación UV-B que llega a la superficie de la tierra. Dichas radiaciones pueden ser causa de un aumento de algunas enfermedades en humanos (cáncer de piel, supresión del sistema inmunitario, cataratas), afectan a la producción agrícola, a la degradación de materiales plásticos e interfieren en los ecosistemas. La mayoría de los cloruros y bromuros, procedentes de compuestos fluorocarbonados, CFCs y otras fuentes, reaccionan en presencia de las nubes estratosféricas polares (PSCs) emitiendo cloruros y bromuros activos que bajo la acción catalizadora de los UV provocan la descomposición del ozono.

Guinée y col., (2002) definen el indicador del agotamiento de ozono, DO, como la suma de los potenciales de agotamiento de ozono, ODPs, para las diferentes sustancias multiplicados por la masa en kg de cada una de ellas. DO se expresa en unidades relativas al efecto que produce 1 kg de CFC-11.

$$DO = \sum_i ODP_i \times m_i$$

Ecuación 10

El concepto de ODP, se define como la relación entre la descomposición del ozono en el estado de equilibrio debido a las emisiones anuales, flujo en  $Kg \cdot año^{-1}$  de una cantidad de una sustancia  $i$ , emitida a la atmósfera y la descomposición del ozono en estado de equilibrio debido a una cantidad igual de CFC-11.

$$ODP_i = \frac{\delta [O_3]}{\delta [O_3]_{CFC-11}}$$

Ecuación 11

La organización meteorológica mundial, WMO, publica periódicamente estimaciones de los ODPs para diferentes sustancias, aceptándose que el tiempo de integración es infinito por tratarse de potenciales estables en el tiempo. Sin embargo, el grado de impacto vendrá influenciado por las condiciones atmosféricas de contaminación en el momento y lugar de la emisión. Para tener en cuenta el efecto local en la emisión se establecen tres índices, medio, alto y bajo correspondientes a zonas de media, alta y baja contaminación atmosférica.

### 3.7.6. Toxicidad humana (HT)

En esta categoría se contemplan los efectos sobre los humanos de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente. Esta categoría es aquella para la cual el factor destino y especialmente el transporte a través de diferentes medios tiene más importancia.

Un contaminante no permanece en el medio, compartimento ambiental, (entiéndase aire, suelo, agua superficial, agua subterránea, mar) en que es emitido, sino que puede desplazarse y alcanzar otros compartimentos que serán a su vez contaminados. Una determinada sustancia puede incluso ser más dañina en un medio diferente al de su emisión.

El cálculo del impacto de toxicidad en humanos, HT, vendrá determinado por:

$$HT = \sum_n \sum_i HTP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i$$

Ecuación 12

siendo  $HTP_{i,n}$  el factor de caracterización,  $f_{i,n}$  la fracción de la sustancia  $i$  que se transporta desde el invernadero al compartimento ambiental  $n$ , adimensional y  $m$  la masa emitida de cada contaminante.

### 3.7.7. Oxidación fotoquímica (PO)

Bajo la influencia de la radiación solar, los óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ , reaccionan con los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) para producir ozono troposférico, este fenómeno tiene lugar principalmente durante los meses de verano. La presencia de monóxido de carbono puede igualmente contribuir a la formación de ozono.

Estos oxidantes foto-químicos pueden resultar perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas y la agricultura. Para el cálculo del indicador de formación de foto-oxidantes, PO, se utiliza como factor de caracterización, POCP, Photo-chemical Ozone Creation Potentials, (Guinée y col., 2002). Se mide respecto al efecto producido por 1 kg de etileno.

$$PO = \sum_i POCP_i \times m_i$$

Ecuación 13

POCP<sub>*i*</sub> se define como la relación entre el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de un VOC y el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de etileno. Se expresa mediante la fórmula:

$$POCP_i = \frac{a_i/b_i}{a_{C_2H_4}/b_{C_2H_4}}$$

Ecuación 14

donde *a* representa el cambio en la concentración de ozono debido a un cambio en la emisión de VOC *i*, *b* es emisión del VOC *i* integrada en el tiempo considerado. El denominador contiene estas mismas variables para el etileno, sustancia de referencia.

Se han calculado los POCPs de diferentes VOCs, sin embargo, estos potenciales pueden variar en función de la concentración inicial de  $\text{NO}_x$  asumida. Los  $\text{NO}_x$  actúan como catalizadores en esta reacción química, no son por tanto consumidos, pero en función de la concentración de  $\text{NO}_x$  se verá afectada la producción de foto-oxidantes. Diferentes factores como concentración de industrias, infraestructura de transportes, etc., influirán en la concentración de  $\text{NO}_x$ .

## 4. Resultados y discusión

El análisis de impactos se realizó para las categorías de impacto especificadas en el apartado 4.2.: *agotamiento de los recursos abióticos (AR)*, *acidificación del aire (AI)*, *eutrofización (EI)*, *calentamiento global (GWP)*, *destrucción del ozono estratosférico (ODP)*, *toxicidad humana (HT)* y *oxidación fotoquímica (PO)*, en los tres sistemas de cultivo considerados (AL, M y MN).

Los análisis realizados fueron los siguientes:

- Análisis individual de los impactos en cada sistema de cultivo
- Análisis individual de los subsistemas evaluados
- Comparación de los tres sistemas de cultivo (M, MN y AL)

### 4.1. Análisis individual de los impactos en cada sistema de cultivo

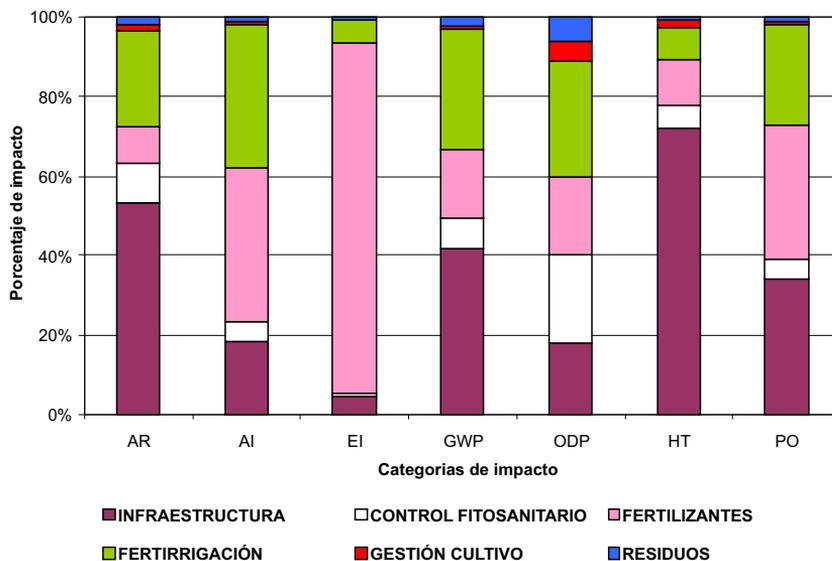
Para la correcta interpretación de los resultados de este apartado, hay que tener en cuenta que se consideraron los siguientes **subsistemas**: INFRAESTRUCTURA (IN), CONTROL FITOSANITARIO (CF), FERTILIZANTES (FE), FERTIRRIGACIÓN (FR), GESTIÓN DEL CULTIVO (GC), GESTIÓN DE LA NEBULIZACIÓN (GN) Y RESIDUOS (RE).

Para comparar los tres sistemas de cultivo se tuvo en cuenta la producción comercial obtenida, en los ciclos 2008 y 2009 (tabla 8). Los resultados obtenidos fueron por unidad de judía verde producida, mayor en el ciclo 2008. Por tanto, los sistemas de cultivo durante el ciclo 2009 tuvieron mayor impacto que sus homónimos en 2008, como veremos a continuación.

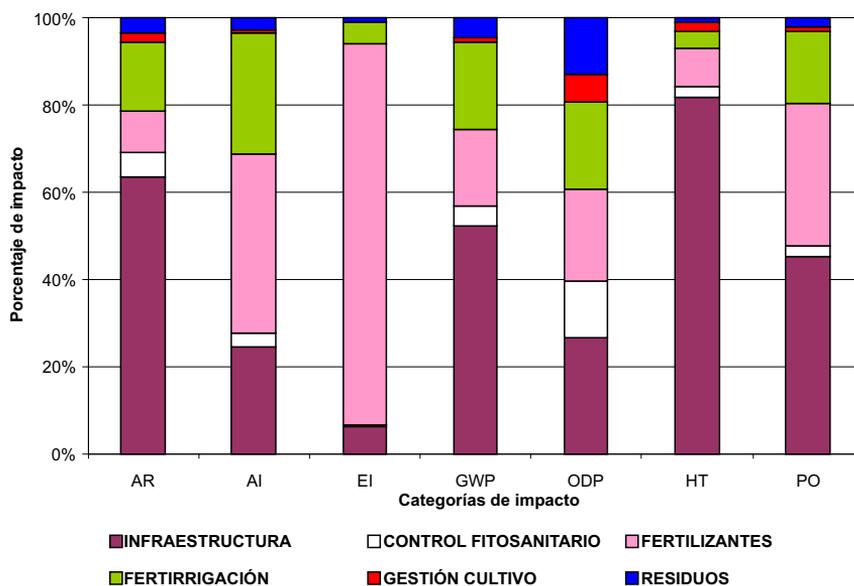
#### 4.1.1. Sistema de cultivo al Aire Libre (AL)

Los resultados del análisis del impacto para los diferentes subsistemas en el sistema de cultivo AL se muestran, como porcentaje del impacto total, en las figuras 7 y 8. Los valores absolutos de impacto por categorías y la contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo al aire libre para los ciclos 2008 y 2009, se muestran en las tablas 16 y 17, respectivamente.

De manera global se observa que los subsistemas INFRAESTRUCTURA, FERTILIZANTES y FERTIRRIGACIÓN adquieren mayor importancia en todas las categorías y en los dos ciclos de cultivo.



**Figura 7.** Sistema de cultivo al aire libre para el ciclo 2008. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: agotamiento de los recursos abióticos (AR), acidificación del aire (AI), eutrofización (EI), calentamiento global (GWP), destrucción del ozono estratosférico (ODP), toxicidad humana (HT) y oxidación fotoquímica (PO)



**Figura 8.** Sistema de cultivo al aire libre para el ciclo 2009. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: *agotamiento de los recursos abióticos (AR), acidificación del aire (AI), eutrofización (EI), calentamiento global (GWP), destrucción del ozono estratosférico (ODP), toxicidad humana (HT) y oxidación fotoquímica (PO)*

La categoría sobre la que tiene el mayor impacto el subsistema INFRAESTRUCTURA fue HT con un total de 72,1% para el ciclo 2008 y de 81,9% para el ciclo 2009. Entre las emisiones que contribuyen a este impacto, fue el Cromo VI la emisión más destacada en esta categoría ( $4,91E-02$  Kg 1.4-DB eq. en 2008 y  $1,96E-01$  Kg 1.4-DB eq. en 2009). El alto impacto ambiental en el subsistema INFRAESTRUCTURA, se debe al entutorado metálico, constituido por postes y alambres, instalado en la parcela al aire libre (véase apartado 4.1.1.3.).

El mayor impacto porcentual provocado por la fabricación de FERTILIZANTES se produjo en las categorías EI y AI (88,4% y 38,7% respectivamente para el ciclo 2008). En el ciclo 2009 este impacto contribuyó de forma similar: EI, 87,6% y AI, 41,2%. Las principales emisiones que afectan a estas categorías fueron: los fosfatos en EI ( $6,05E-04$  Kg  $PO_4^{-2}$  eq. en 2008 y  $1,59E-03$  Kg  $PO_4^{-2}$  eq en 2009) y el dióxido de azufre en AI ( $4,50E-04$  Kg  $SO_2$  eq en 2008 y  $1,19E-03$  Kg  $SO_2$  eq en 2009).

llegando a un 36,4% y 27,9% para los ciclos de cultivo 2008 y 2009 respectivamente. Las principales emisiones que intervienen en esta categoría (amonio, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre) contribuyeron de forma muy similar, tanto en el ciclo 2008 como en 2009 (tablas 16 y 17).

El CONTROL FITOSANITARIO tuvo un impacto inferior a IN, FE y FR en todas las categorías excepto en AR y ODP donde su impacto fue similar al producido por los FERTILIZANTES. En ODP, el CONTROL FITOSANITARIO contribuyó al impacto ambiental, con un 21,9% para el ciclo 2008 y 13,1% para el ciclo 2009.

El resto de subsistemas (GESTIÓN DEL CULTIVO Y RESIDUOS) suponen un impacto mínimo relativo en las categorías estudiadas. Estos subsistemas alcanzaron su mayor porcentaje de impacto para la categoría ODP.

**Tabla 16.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo al aire libre para el ciclo 2008 (unidades según especificaciones de tabla 15)

	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>8,34E-04</b>	<b>4,60E-04</b>	<b>1,06E-04</b>	<b>9,34E-05</b>	<b>1,38E-04</b>	<b>1,64E-05</b>	<b>1,99E-05</b>
(r) Carbón	6,27E-05	2,08E-05	1,08E-05	9,1E-06	2,11E-05	5,09E-07	3,41E-07
(r) Gas natural	3,73E-04	2,04E-04	3,93E-05	5,26E-05	7,23E-05	2,22E-06	1,74E-06
(r) Petróleo	3,99E-04	2,34E-04	5,63E-05	3,18E-05	4,50E-05	1,37E-05	1,78E-05
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>7,54E-04</b>	<b>1,15E-04</b>	<b>3,15E-05</b>	<b>4,54E-04</b>	<b>1,49E-04</b>	<b>2,13E-06</b>	<b>1,67E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	8,13E-05	5,88E-06	1,38E-07	4,45E-07	7,47E-05	7,03E-08	5,54E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	7,16E-05	1,51E-05	4,35E-06	3,82E-06	4,68E-05	7,91E-07	7,24E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	6,01E-04	9,43E-05	2,7E-05	4,50E-04	2,77E-05	1,27E-06	8,88E-07
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>6,41E-04</b>	<b>8,60E-06</b>	<b>1,09E-06</b>	<b>6,09E-04</b>	<b>2,13E-05</b>	<b>8,44E-08</b>	<b>5,52E-08</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	1,78E-05	1,29E-06	3,03E-08	9,73E-08	1,64E-05	1,54E-08	1,21E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	1,81E-05	7,28E-06	1,06E-06	4,65E-06	4,99E-06	6,83E-08	4,26E-08
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	6,05E-04	3,26E-08	2,75E-09	6,05E-04	2,15E-09	6,77E-10	4,62E-10
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>2,57E-02</b>	<b>1,50E-02</b>	<b>2,69E-04</b>	<b>7,22E-03</b>	<b>5,03E-04</b>	<b>3,92E-04</b>	<b>2,30E-03</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	1,92E-02	1,49E-02	2,30E-04	9,81E-04	3,44E-04	3,89E-04	2,29E-03
(a) Monóxido de dinitrógeno (N <sub>2</sub> O)	6,54E-03	1,02E-04	3,92E-05	6,24E-03	1,59E-04	2,95E-06	1,51E-06
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>6,19E-09</b>	<b>1,25E-09</b>	<b>1,62E-09</b>	<b>1,42E-09</b>	<b>1,89E-09</b>	<b>3,62E-10</b>	<b>4,73E-10</b>
(a) Halon 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	2,60E-09	4,33E-10	4,63E-10	7,14E-10	9,68E-10	1,87E-11	7,59E-12
(a) Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	4,42E-09	8,16E-10	1,16E-09	7,08E-10	9,26E-10	3,44E-10	4,66E-10
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>6,50E-02</b>	<b>5,61E-02</b>	<b>1,00E-03</b>	<b>4,44E-03</b>	<b>1,67E-03</b>	<b>1,62E-03</b>	<b>2,14E-04</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	5,40E-03	4,05E-03	1,33E-04	7,60E-04	1,38E-04	1,75E-04	1,47E-04
(a) Arsénico (As)	5,51E-03	2,95E-03	4,62E-04	1,20E-03	6,76E-04	1,82E-04	4,03E-05
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	5,41E-02	4,91E-02	4,08E-04	2,48E-03	8,53E-04	1,26E-03	2,66E-05
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>3,50E-05</b>	<b>1,37E-05</b>	<b>1,17E-06</b>	<b>1,84E-05</b>	<b>1,21E-06</b>	<b>3,16E-07</b>	<b>2,25E-07</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	1,09E-05	9,91E-06	8,6E-08	3,74E-07	1,07E-07	2,66E-07	1,89E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	2,40E-05	3,77E-06	1,08E-06	1,8E-05	1,11E-06	5,06E-08	3,55E-08

(a) emisiones aire; (r) recurso no renovable; (w) emisiones agua

**Tabla 17.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo al aire libre para el ciclo 2009 (unidades según especificaciones de tabla 15)

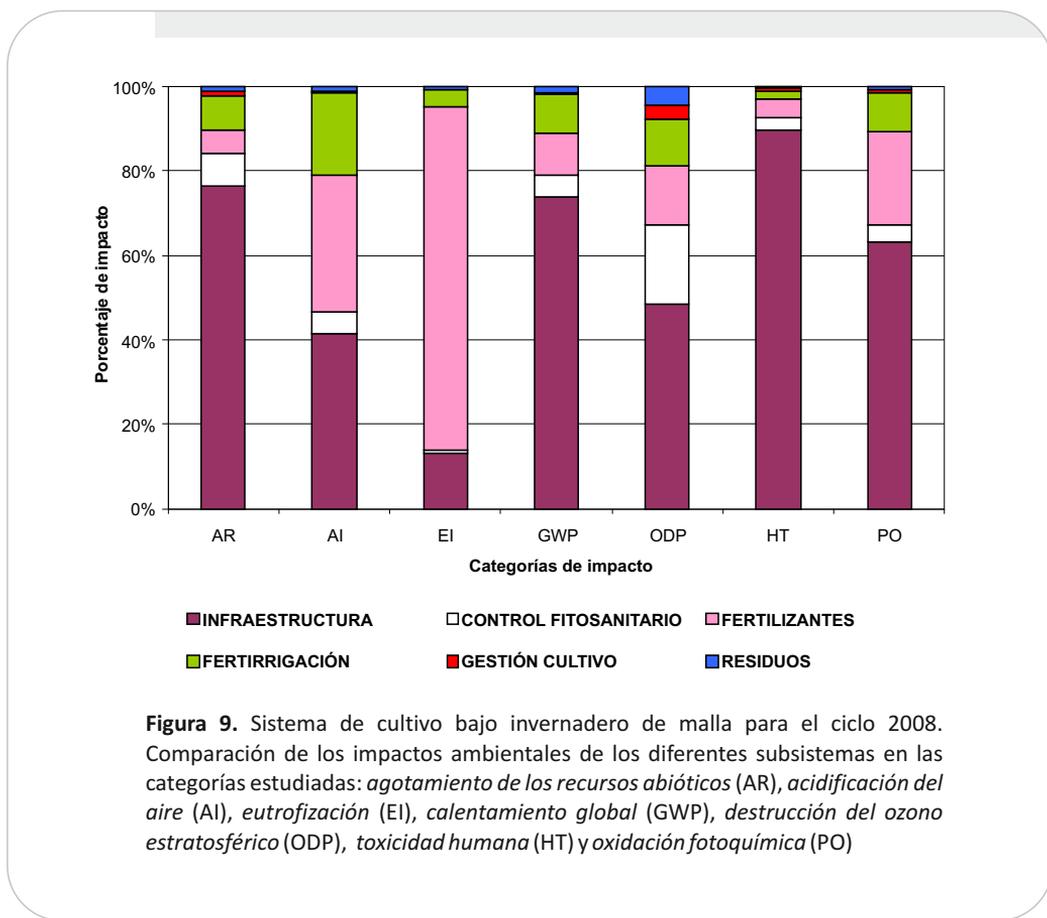
	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>3,06E-03</b>	<b>1,97E-03</b>	<b>1,68E-04</b>	<b>2,76E-04</b>	<b>4,80E-04</b>	<b>6,70E-05</b>	<b>1,07E-04</b>
(r) Carbón	1,11E-03	7,36E-04	2,54E-05	5,33E-05	2,78E-04	1,52E-05	6,98E-06
(r) Gas natural	9,10E-04	5,71E-04	6,06E-05	1,39E-04	1,25E-04	7,24E-06	8,90E-06
(r) Petróleo	1,04E-03	6,60E-04	8,18E-05	8,38E-05	7,75E-05	4,46E-05	9,11E-05
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>1,95E-03</b>	<b>3,79E-04</b>	<b>4,57E-05</b>	<b>1,23E-03</b>	<b>2,77E-04</b>	<b>5,22E-06</b>	<b>5,65E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	2,21E-04	2,33E-05	2,28E-07	1,17E-06	1,96E-04	2,29E-07	2,83E-07
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	1,68E-04	7,97E-05	6,23E-06	4,71E-05	3,31E-05	8,58E-07	8,36E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	1,56E-03	2,76E-04	3,93E-05	1,19E-03	4,76E-05	4,13E-06	4,54E-06
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>1,69E-03</b>	<b>2,59E-05</b>	<b>1,67E-06</b>	<b>1,61E-03</b>	<b>5,15E-05</b>	<b>2,75E-07</b>	<b>2,82E-07</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	4,84E-05	5,09E-06	5,00E-08	2,57E-07	4,29E-05	5,02E-08	6,19E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	4,36E-05	2,07E-05	1,62E-06	1,23E-05	8,60E-06	2,23E-07	2,17E-07
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	1,60E-03	1,30E-07	4,12E-09	1,59E-03	3,71E-09	2,21E-09	2,36E-09
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>1,42E-01</b>	<b>7,96E-02</b>	<b>8,89E-03</b>	<b>2,53E-02</b>	<b>2,54E-02</b>	<b>1,78E-03</b>	<b>1,35E-03</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	1,42E-01	7,96E-02	8,89E-03	2,53E-02	2,54E-02	1,78E-03	1,35E-03
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>1,76E-08</b>	<b>4,55E-09</b>	<b>2,41E-09</b>	<b>3,75E-09</b>	<b>3,26E-09</b>	<b>1,18E-09</b>	<b>2,42E-09</b>
(a) Halon 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	5,86E-09	1,49E-09	7,19E-10	1,88E-09	1,67E-09	6,11E-11	3,87E-11
(a) Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	1,17E-08	3,06E-09	1,69E-09	1,87E-09	1,60E-09	1,12E-09	2,38E-09
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>2,46E-01</b>	<b>2,24E-01</b>	<b>1,64E-03</b>	<b>1,17E-02</b>	<b>2,87E-03</b>	<b>5,28E-03</b>	<b>1,09E-03</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	1,99E-02	1,61E-02	2,09E-04	2,00E-03	2,38E-04	5,71E-04	7,51E-04
(a) Arsénico (As)	1,75E-02	1,17E-02	7,38E-04	3,16E-03	1,16E-03	5,94E-04	2,06E-04
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	2,09E-01	1,96E-01	6,98E-04	6,53E-03	1,47E-03	4,11E-03	1,36E-04
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>1,05E-04</b>	<b>5,07E-05</b>	<b>1,72E-06</b>	<b>4,84E-05</b>	<b>2,09E-06</b>	<b>1,03E-06</b>	<b>1,15E-06</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	4,28E-05	3,97E-05	1,45E-07	9,86E-07	1,84E-07	8,68E-07	9,65E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	6,23E-05	1,10E-05	1,57E-06	4,74E-05	1,91E-06	1,65E-07	1,81E-07

(a) emisiones aire; (r) recurso no renovable; (w) emisiones agua

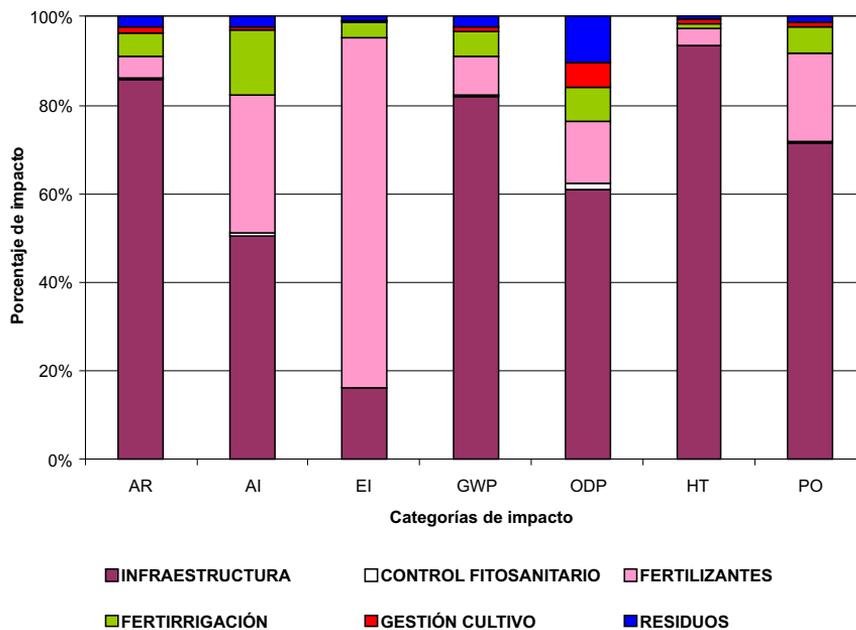
### 4.1.2. Sistema de cultivo bajo invernadero de malla (M)

En las figuras 9 y 10 se muestran los resultados del análisis del impacto en porcentaje sobre el impacto total para los diferentes subsistemas del sistema de cultivo M, y en las tablas 18 y 19 los valores absolutos de impacto por categorías y la contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en dicho sistema de cultivo, para los ciclos 2008 y 2009.

En las categorías estudiadas los subsistemas que generaron un mayor impacto porcentual para ambos ciclos de cultivo, son: INFRAESTRUCTURA y en menor medida, FERTILIZANTES.



**Figura 9.** Sistema de cultivo bajo invernadero de malla para el ciclo 2008. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: *agotamiento de los recursos abióticos (AR)*, *acidificación del aire (AI)*, *eutrofización (EI)*, *calentamiento global (GWP)*, *destrucción del ozono estratosférico (ODP)*, *toxicidad humana (HT)* y *oxidación fotoquímica (PO)*



**Figura 10.** Sistema de cultivo bajo invernadero de malla para el ciclo 2009. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: agotamiento de los recursos abióticos (AR), acidificación del aire (AI), eutrofización (EI), calentamiento global (GWP), destrucción del ozono estratosférico (ODP), toxicidad humana (HT) y oxidación fotoquímica (PO)

La categoría sobre la que ejerció un mayor impacto ambiental porcentual la INFRAESTRUCTURA fue, HT, que alcanza valores de 89,9% y 93,5% para el ciclo 2008 y 2009 respectivamente, seguida de las categorías AR y GWP con valores próximos, para ambas categorías, al 75% para el ciclo 2008 y 84% para el ciclo 2009. Nuevamente, la principal emisión de la INFRAESTRUCTURA que influye en la categoría HT fue el Cromo VI ( $6,56E-02$  Kg 1.4-DB eq en 2008 y  $1,19E-01$  Kg 1.4-DB eq en 2009). En las tablas 18 y 19, se muestran las principales emisiones que contribuyen a las categorías AR y GWP, cuyos valores absolutos son mayores en 2009.

Para la categoría EI, en ambos ciclos, 2008 y 2009, los FERTILIZANTES presentan los valores de impacto ambiental mayores, 81,6% y 79,2% respectivamente. Los fosfatos siguen siendo las emisiones que contribuyen con los valores absolutos más altos en EI. Dichos valores fueron muy similares en los ciclos 2008 y 2009 ( $2,55E-04$  Kg  $PO_4^{-2}$  eq y  $3,71E-04$  Kg  $PO_4^{-2}$  eq respectivamente).

La categoría más afectada por el subsistema FERTIRRIGACIÓN, fue AI (19,2% en 2008 y 14,7% en 2009). El resto de subsistemas (CONTROL FITOSANITARIO, GESTIÓN DEL CULTIVO Y RESIDUOS) contribuyeron a las categorías estudiadas con menor importancia respecto al resto de los subsistemas; el mayor porcentaje de impacto se alcanzó para la categoría ODP. En este caso, en el ciclo 2008 el subsistema que ejerció un mayor impacto fue el CONTROL FITOSANITARIO (18,9%) y en el ciclo 2009, los RESIDUOS (10,5%).

**Tabla 18.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo bajo invernadero de malla para el ciclo 2008 (unidades según especificaciones de tabla 15)

	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>7,97E-04</b>	<b>6,14E-04</b>	<b>5,71E-05</b>	<b>4,41E-05</b>	<b>6,35E-05</b>	<b>9,00E-06</b>	<b>8,91E-06</b>
(r) Carbón	3,11E-04	2,56E-04	7,46E-06	8,53E-06	3,68E-05	2,04E-06	5,81E-07
(r) Gas natural	2,19E-04	1,58E-04	2,01E-05	2,22E-05	1,65E-05	9,72E-07	7,41E-07
(r) Petróleo	2,67E-04	2,01E-04	2,95E-05	1,34E-05	1,02E-05	5,98E-06	7,59E-06
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>2,50E-04</b>	<b>1,18E-04</b>	<b>1,45E-05</b>	<b>1,12E-05</b>	<b>9,92E-05</b>	<b>1,50E-06</b>	<b>6,01E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	4,05E-05	8,84E-06	6,97E-08	1,88E-07	3,13E-05	3,08E-08	2,36E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	5,74E-05	4,91E-05	4,33E-07	1,52E-06	1,25E-06	2,18E-07	4,94E-06
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	1,53E-04	6,02E-05	1,40E-05	9,50E-06	6,66E-05	1,25E-06	1,05E-06
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>2,74E-04</b>	<b>7,77E-06</b>	<b>5,65E-07</b>	<b>2,57E-04</b>	<b>7,99E-06</b>	<b>3,70E-08</b>	<b>2,35E-08</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	8,86E-06	1,93E-06	1,52E-08	4,11E-08	6,86E-06	6,73E-09	5,15E-09
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	9,48E-06	5,79E-06	5,49E-07	1,96E-06	1,14E-06	2,99E-08	1,81E-08
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	2,55E-04	4,38E-08	1,43E-09	2,55E-04	4,90E-10	2,96E-10	1,96E-10
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>3,86E-02</b>	<b>3,69E-02</b>	<b>1,17E-04</b>	<b>4,14E-04</b>	<b>7,83E-05</b>	<b>1,70E-04</b>	<b>9,75E-04</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	3,86E-02	3,69E-02	1,17E-04	4,14E-04	7,83E-05	1,70E-04	9,75E-04
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>4,29E-09</b>	<b>2,05E-09</b>	<b>8,46E-10</b>	<b>6,00E-10</b>	<b>4,31E-10</b>	<b>1,59E-10</b>	<b>2,01E-10</b>
(a) Halon 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	1,25E-09	4,85E-10	2,37E-10	3,01E-10	2,20E-10	8,19E-12	3,23E-12
(a) Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	3,03E-09	1,57E-09	6,09E-10	2,99E-10	2,11E-10	1,50E-10	1,98E-10
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>7,91E-02</b>	<b>7,55E-02</b>	<b>5,07E-04</b>	<b>1,87E-03</b>	<b>3,80E-04</b>	<b>7,08E-04</b>	<b>9,09E-05</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	6,37E-03	5,81E-03	6,80E-05	3,21E-04	3,15E-05	7,66E-05	6,25E-05
(a) Arsénico (As)	5,13E-03	4,14E-03	2,33E-04	5,06E-04	1,54E-04	7,97E-05	1,71E-05
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	6,76E-02	6,56E-02	2,06E-04	1,04E-03	1,94E-04	5,52E-04	1,13E-05
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>2,57E-05</b>	<b>1,68E-05</b>	<b>6,10E-07</b>	<b>7,75E-06</b>	<b>2,76E-07</b>	<b>1,39E-07</b>	<b>9,55E-08</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	1,41E-05	1,37E-05	4,37E-08	1,58E-07	2,44E-08	1,16E-07	8,03E-08
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	1,16E-05	3,14E-06	5,66E-07	7,59E-06	2,52E-07	2,22E-08	1,51E-08

(a) emisiones aire, (r) recurso no renovable, (w) emisiones agua

**Tabla 19.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo bajo invernadero de malla para el ciclo 2009 (unidades según especificaciones de tabla 15)

	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>1,31E-03</b>	<b>1,12E-03</b>	<b>6,05E-06</b>	<b>6,41E-05</b>	<b>6,54E-05</b>	<b>1,99E-05</b>	<b>3,08E-05</b>
(r) Carbón	5,24E-04	4,66E-04	1,53E-06	1,24E-05	3,79E-05	4,53E-06	2,01E-06
(r) Gas natural	3,45E-04	2,89E-04	1,96E-06	3,22E-05	1,70E-05	2,15E-06	2,56E-06
(r) Petróleo	4,39E-04	3,67E-04	2,56E-06	1,95E-05	1,06E-05	1,33E-05	2,62E-05
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>6,02E-04</b>	<b>2,49E-04</b>	<b>1,32E-06</b>	<b>2,78E-04</b>	<b>5,35E-05</b>	<b>1,78E-06</b>	<b>1,85E-05</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	6,20E-05	1,61E-05	1,22E-08	2,73E-07	4,55E-05	6,82E-08	8,14E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	1,11E-04	8,93E-05	5,82E-08	2,21E-06	1,54E-06	4,82E-07	1,71E-05
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	4,30E-04	1,44E-04	1,25E-06	2,76E-04	6,49E-06	1,23E-06	1,30E-06
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>3,99E-04</b>	<b>1,42E-05</b>	<b>7,21E-08</b>	<b>3,74E-04</b>	<b>1,11E-05</b>	<b>8,19E-08</b>	<b>8,10E-08</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	1,36E-05	3,52E-06	2,66E-09	5,97E-08	9,94E-06	1,49E-08	1,78E-08
(w) Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,48E-05	1,06E-05	6,93E-08	2,85E-06	1,17E-06	6,63E-08	6,25E-08
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	3,71E-04	7,96E-08	1,33E-10	3,71E-04	5,05E-10	6,57E-10	6,78E-10
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>7,16E-02</b>	<b>6,72E-02</b>	<b>2,12E-05</b>	<b>6,02E-04</b>	<b>8,07E-05</b>	<b>3,78E-04</b>	<b>3,37E-03</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	7,16E-02	6,72E-02	2,12E-05	6,02E-04	8,07E-05	3,78E-04	3,37E-03
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>6,18E-09</b>	<b>3,74E-09</b>	<b>7,66E-11</b>	<b>8,71E-10</b>	<b>4,44E-10</b>	<b>3,52E-10</b>	<b>6,95E-10</b>
(a) Halón 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	1,60E-09	8,85E-10	2,37E-11	4,37E-10	2,27E-10	1,82E-11	1,11E-11
(a) Halón 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	4,58E-09	2,86E-09	5,29E-11	4,34E-10	2,17E-10	3,33E-10	6,84E-10
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>1,42E-01</b>	<b>1,37E-01</b>	<b>9,12E-05</b>	<b>2,72E-03</b>	<b>3,91E-04</b>	<b>1,57E-03</b>	<b>3,14E-04</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	1,15E-02	1,06E-02	8,83E-06	4,66E-04	3,24E-05	1,70E-04	2,16E-04
(a) Arsénico (As)	8,69E-03	7,53E-03	2,52E-05	7,36E-04	1,59E-04	1,77E-04	5,91E-05
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	1,22E-01	1,19E-01	5,72E-05	1,52E-03	2,00E-04	1,22E-03	3,91E-05
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>4,28E-05</b>	<b>3,06E-05</b>	<b>6,12E-08</b>	<b>1,13E-05</b>	<b>2,85E-07</b>	<b>3,07E-07</b>	<b>3,30E-07</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	2,56E-05	2,48E-05	1,14E-08	2,29E-07	2,51E-08	2,58E-07	2,78E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	1,72E-05	5,75E-06	4,98E-08	1,10E-05	2,60E-07	4,91E-08	5,22E-08

(a) emisiones aire; (r) recurso no renovable; (w) emisiones agua

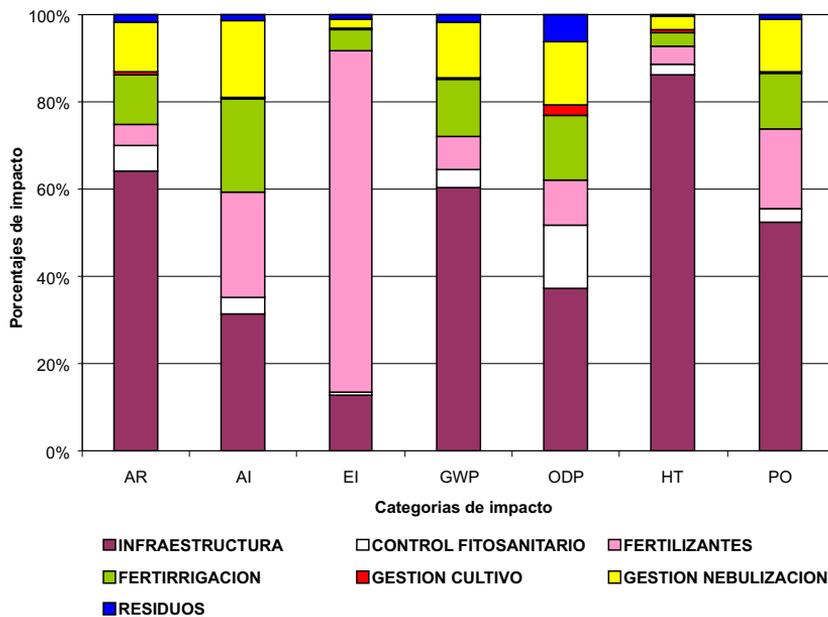
### 4.1.3. Sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización (MN)

En las figuras 11 y 12 y en las tablas 20 y 21 se observan en porcentaje sobre el impacto total y en valor absoluto, los resultados del análisis del impacto por categorías y la contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo MN para los ciclos 2008 y 2009.

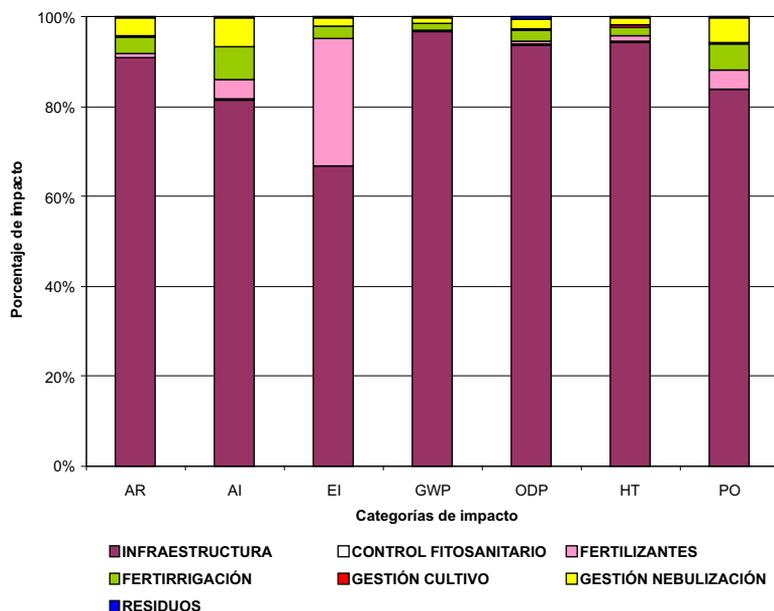
En MN hay diferencias importantes en cuanto al impacto porcentual generado por los diferentes subsistemas entre los dos ciclos de cultivo. En el ciclo 2008, fueron la INFRAESTRUCTURA y en menor medida los FERTILIZANTES, los subsistemas de mayor impacto en gran parte de las categorías. La GESTIÓN DE LA NEBULIZACIÓN y la FERTIRRIGACIÓN también tuvieron una contribución relativamente elevada en este impacto ambiental sobre algunas categorías.

En el ciclo 2008, la INFRAESTRUCTURA produjo mayor impacto en las categoría HT, con un 86,1%, seguida de las categorías AR con 64,1%, GWP con 60,5%, PO con 52,6%, ODP con 37,2% y AI con 31,5%. La categoría EI presentó un porcentaje de impacto del 78,3% provocado por el subsistema FERTILIZANTES. La categoría AI también quedó afectada en un porcentaje no despreciable por la GESTIÓN DE LA NEBULIZACIÓN (17,4%).

En el ciclo 2009, todas las categorías sufrieron el mayor impacto porcentual por parte de la INFRAESTRUCTURA, provocando la mayor carga ambiental en la categoría GWP, donde se alcanzaron el valor de 96,7% de impacto. Le siguen, con valores también muy altos, las categorías HT con 94,5%, ODP con 93,8%, AR con 90,9%, PO con 83,9%, AI con 81,6% y EI con 66,8%. Para el resto de subsistemas, el porcentaje de impacto relativo sobre las diferentes categorías fue inferior, y su efecto fue eclipsado por el impacto generado por la INFRAESTRUCTURA.



**Figura 11.** Sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización para el ciclo 2008. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: *agotamiento de los recursos abióticos (AR), acidificación del aire (AI), eutrofización (EI), calentamiento global (GWP), destrucción del ozono estratosférico (ODP), toxicidad humana (HT) y oxidación fotoquímica (PO)*



**Figura 12.** Sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización para el ciclo 2009. Comparación de los impactos ambientales de los diferentes subsistemas en las categorías estudiadas: *agotamiento de los recursos abióticos (AR)*, *acidificación del aire (AI)*, *eutrofización (EI)*, *calentamiento global (GWP)*, *destrucción del ozono estratosférico (ODP)*, *toxicidad humana (HT)* y *oxidación fotoquímica (PO)*

En ambos ciclos, la INFRAESTRUCTURA fue el subsistema con mayor porcentaje de impacto sobre la categoría HT. Al igual que en el resto de los sistemas de cultivo, el Cromo VI adquiere valores absolutos superiores al resto de las emisiones que intervienen en esta categoría (hidrocarburos y arsénico) (ver tablas 20 y 21). Estos valores fueron  $5,17E-02$  Kg 1.4-DB eq. en 2008 y  $1,35E-01$  Kg 1.4-DB eq. en 2009. En la categoría EI destacó en 2008 el impacto de la fabricación de FERTILIZANTES, provocando emisiones de amonio, óxidos de nitrógeno y fosfatos, adquiriendo mayor importancia estos últimos, con un valor absoluto de  $2,00E-04$  Kg  $PO_4^{-2}$  eq.

No obstante, el ciclo 2009 en MN, no fue representativo de un ciclo de cultivo típico característico de la zona, ya que tampoco lo fue la producción obtenida durante este ciclo, menor de la mitad que la producción obtenida en el ciclo 2008 (véase capítulo 2). Hay que considerar que al ser menor la producción, los impactos ambientales generados para obtener un kilogramo de producto comercial serán mayores. En este caso, debido al mayor impacto que ejercen los materiales que

componen la INFRAESTRUCTURA respecto al resto de subsistemas, la presión ambiental que producen en todas las categorías fue muy alta.

**Tabla 20.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización para el ciclo 2008 (unidades según especificaciones de tabla 15)

	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	GN	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>7,73E-04</b>	<b>5,00E-04</b>	<b>4,48E-05</b>	<b>3,46E-05</b>	<b>8,72E-05</b>	<b>7,06E-06</b>	<b>8,70E-05</b>	<b>1,23E-05</b>
(r) Carbón	3,19E-04	2,03E-04	5,86E-06	6,69E-06	5,05E-05	1,60E-06	5,04E-05	8,04E-07
(r) Gas natural	2,11E-04	1,31E-04	1,58E-05	1,74E-05	2,26E-05	7,62E-07	2,26E-05	1,02E-06
(r) Petróleo	2,43E-04	1,66E-04	2,32E-05	1,05E-05	1,41E-05	4,69E-06	1,40E-05	1,05E-05
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>3,24E-04</b>	<b>1,10E-04</b>	<b>1,15E-05</b>	<b>1,50E-04</b>	<b>3,47E-05</b>	<b>6,30E-07</b>	<b>9,82E-06</b>	<b>7,39E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	3,23E-05	6,97E-06	5,47E-08	1,47E-07	2,47E-05	2,42E-08	3,12E-07	3,26E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	4,95E-05	3,87E-05	3,40E-07	1,20E-06	1,35E-06	1,71E-07	8,78E-07	6,83E-06
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	2,43E-04	6,44E-05	1,11E-05	1,49E-04	8,65E-06	4,35E-07	8,63E-06	5,22E-07
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>2,17E-04</b>	<b>6,38E-06</b>	<b>4,44E-07</b>	<b>2,02E-04</b>	<b>6,97E-06</b>	<b>2,90E-08</b>	<b>1,63E-06</b>	<b>3,24E-08</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	7,06E-06	1,53E-06	1,20E-08	3,22E-08	5,41E-06	5,28E-09	6,83E-08	7,13E-09
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	9,96E-06	4,82E-06	4,31E-07	1,54E-06	1,56E-06	2,35E-08	1,56E-06	2,50E-08
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	2,00E-04	3,45E-08	1,12E-09	2,00E-04	6,73E-10	2,33E-10	6,72E-10	2,71E-10
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>3,11E-02</b>	<b>2,90E-02</b>	<b>9,20E-05</b>	<b>3,25E-04</b>	<b>1,08E-04</b>	<b>1,34E-04</b>	<b>1,07E-04</b>	<b>1,35E-03</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	3,11E-02	2,90E-02	9,20E-05	3,25E-04	1,08E-04	1,34E-04	1,07E-04	1,35E-03
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>4,35E-09</b>	<b>1,63E-09</b>	<b>6,64E-10</b>	<b>4,71E-10</b>	<b>5,92E-10</b>	<b>1,25E-10</b>	<b>5,91E-10</b>	<b>2,78E-10</b>
(a) Halon 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	1,43E-09	3,89E-10	1,86E-10	2,36E-10	3,03E-10	6,43E-12	3,02E-10	4,46E-12
(a) Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	2,92E-09	1,24E-09	4,78E-10	2,34E-10	2,90E-10	1,18E-10	2,89E-10	2,74E-10
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>6,31E-02</b>	<b>5,95E-02</b>	<b>3,98E-04</b>	<b>1,47E-03</b>	<b>5,21E-04</b>	<b>5,56E-04</b>	<b>5,20E-04</b>	<b>1,26E-04</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	5,12E-03	4,58E-03	5,34E-05	2,52E-04	4,32E-05	6,01E-05	4,31E-05	8,64E-05
(a) Arsénico (As)	4,36E-03	3,27E-03	1,83E-04	3,97E-04	2,11E-04	6,26E-05	2,11E-04	2,37E-05
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	5,37E-02	5,17E-02	1,62E-04	8,20E-04	2,67E-04	4,33E-04	2,66E-04	1,56E-05
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>2,09E-05</b>	<b>1,33E-05</b>	<b>4,78E-07</b>	<b>6,08E-06</b>	<b>3,79E-07</b>	<b>1,09E-07</b>	<b>3,79E-07</b>	<b>1,32E-07</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	1,12E-05	1,08E-05	3,43E-08	1,24E-07	3,34E-08	9,14E-08	3,34E-08	1,11E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	9,71E-06	2,58E-06	4,44E-07	5,96E-06	3,46E-07	1,74E-08	3,45E-07	2,09E-08

(a) emisiones aire; (r) recurso no renovable; (s) emisiones suelo; (w) emisiones agua

**Tabla 21.** Valores absolutos de impacto por categorías y contribución de las emisiones más importantes para cada uno de los subsistemas considerados en el sistema de cultivo bajo invernadero de malla con sistema de nebulización para el ciclo 2009 (unidades según especificaciones de tabla 15)

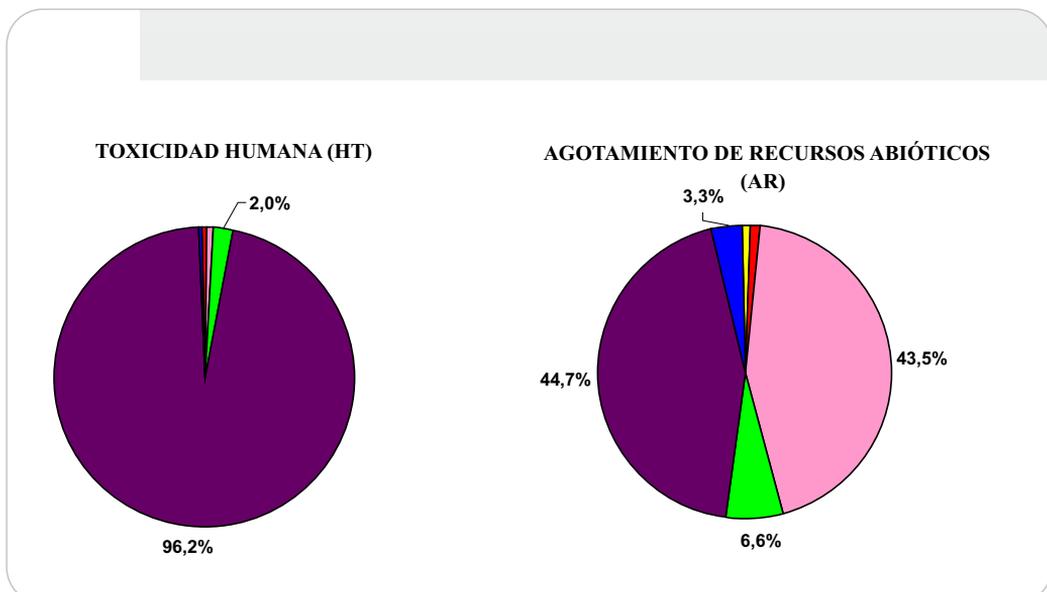
	TOTAL	IN	CF	FE	FR	GC	GN	RE
<b>Agotamiento de recursos Abióticos (AR)</b>	<b>7,26E-03</b>	<b>6,63E-03</b>	<b>5,16E-06</b>	<b>5,46E-05</b>	<b>2,68E-04</b>	<b>1,70E-05</b>	<b>2,68E-04</b>	<b>2,07E-05</b>
(r) Carbón	3,14E-03	2,81E-03	1,31E-06	1,06E-05	1,55E-04	3,86E-06	1,55E-04	1,35E-06
(r) Gas natural	8,83E-04	7,11E-04	1,67E-06	2,75E-05	6,95E-05	1,83E-06	6,95E-05	1,72E-06
(r) Petróleo	3,24E-03	3,11E-03	2,18E-06	1,66E-05	4,33E-05	1,13E-05	4,33E-05	1,76E-05
<b>Acidificación (AI)</b>	<b>1,88E-03</b>	<b>1,74E-03</b>	<b>3,92E-07</b>	<b>2,73E-06</b>	<b>8,47E-05</b>	<b>1,17E-06</b>	<b>4,62E-05</b>	<b>1,04E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	2,10E-04	1,69E-04	1,04E-08	2,33E-07	3,95E-05	5,81E-08	9,62E-07	5,46E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	3,91E-04	2,97E-04	3,60E-07	2,00E-06	4,50E-05	6,55E-07	4,50E-05	7,14E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	1,27E-03	1,27E-03	2,09E-08	5,00E-07	2,14E-07	4,57E-07	2,14E-07	2,75E-07
<b>Eutrofización (EI)</b>	<b>9,15E-04</b>	<b>5,84E-04</b>	<b>1,53E-08</b>	<b>3,17E-04</b>	<b>9,54E-06</b>	<b>1,20E-07</b>	<b>9,16E-07</b>	<b>2,99E-06</b>
(a) Amonio (NH <sub>3</sub> )	4,59E-05	3,70E-05	2,27E-09	5,09E-08	8,64E-06	1,27E-08	2,10E-07	1,20E-08
(a) Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	5,52E-04	5,47E-04	1,29E-08	4,91E-07	8,98E-07	1,07E-07	7,03E-07	2,98E-06
(w) Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	3,16E-04	1,56E-07	1,13E-10	3,16E-04	2,07E-09	5,60E-10	2,07E-09	4,55E-10
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	<b>2,44E+00</b>	<b>2,44E+00</b>	<b>1,80E-05</b>	<b>5,13E-04</b>	<b>3,31E-04</b>	<b>3,22E-04</b>	<b>3,31E-04</b>	<b>2,26E-03</b>
(a) Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fósil)	2,44E+00	2,44E+00	1,80E-05	5,13E-04	3,31E-04	3,22E-04	3,31E-04	2,26E-03
<b>Degradación del ozono Estratosférico (ODP)</b>	<b>9,17E-08</b>	<b>8,65E-08</b>	<b>6,52E-11</b>	<b>7,43E-10</b>	<b>1,82E-09</b>	<b>3,00E-10</b>	<b>1,82E-09</b>	<b>4,67E-10</b>
(a) Halon 1211 (CF <sub>2</sub> ClBr)	6,54E-09	4,26E-09	2,02E-11	3,73E-10	9,30E-10	1,55E-11	9,30E-10	7,48E-12
(a) Halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br)	8,52E-08	8,22E-08	4,51E-11	3,70E-10	8,91E-10	2,84E-10	8,91E-10	4,59E-10
<b>Toxicidad humana (HT)</b>	<b>2,57E-01</b>	<b>2,49E-01</b>	<b>7,77E-05</b>	<b>2,32E-03</b>	<b>1,60E-03</b>	<b>1,34E-03</b>	<b>1,60E-03</b>	<b>2,11E-04</b>
(a) Hidrocarburos aromáticos policíclicos	7,07E-02	6,98E-02	7,52E-06	3,97E-04	1,33E-04	1,45E-04	1,33E-04	1,45E-04
(a) Arsénico (As)	4,63E-02	4,41E-02	2,15E-05	6,27E-04	6,50E-04	1,51E-04	6,50E-04	3,97E-05
(a) Cromo VI (Cr <sup>6+</sup> )	1,40E-01	1,35E-01	4,87E-05	1,29E-03	8,20E-04	1,04E-03	8,20E-04	2,62E-05
<b>Oxidación fotoquímica (PO)</b>	<b>1,30E-04</b>	<b>1,30E-04</b>	<b>1,06E-08</b>	<b>2,15E-07</b>	<b>1,11E-07</b>	<b>2,38E-07</b>	<b>1,11E-07</b>	<b>1,97E-07</b>
(a) Monóxido de carbono (CO, fósil)	7,95E-05	7,86E-05	9,74E-09	1,95E-07	1,03E-07	2,20E-07	1,03E-07	1,86E-07
(a) Dióxido de azufre (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	5,10E-05	5,09E-05	8,35E-10	2,00E-08	8,57E-09	1,83E-08	8,57E-09	1,10E-08

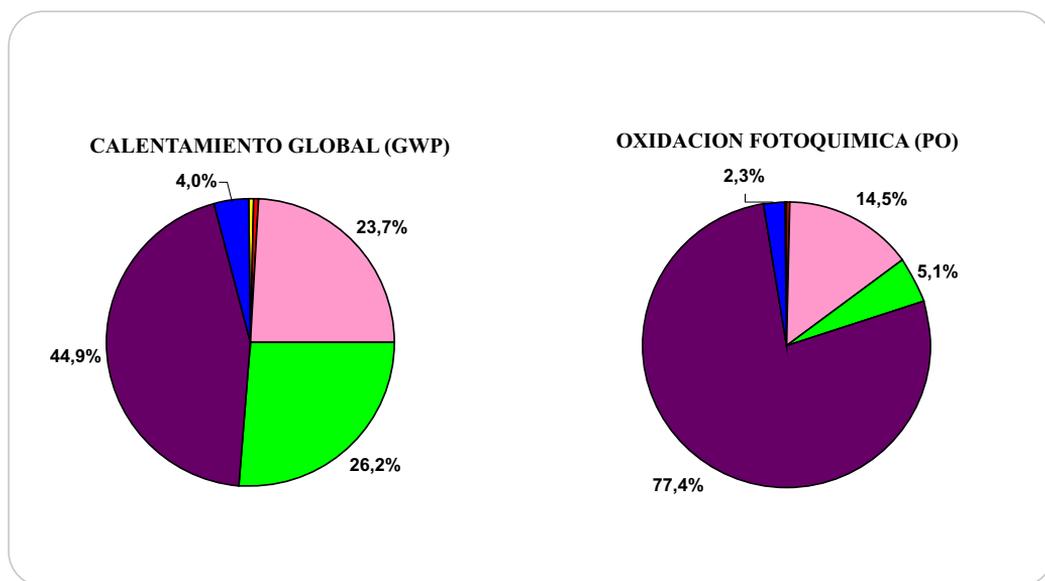
(a) emisiones aire; (r) recurso no renovable; (w) emisiones agua

## 4.2. Análisis individual de los subsistemas evaluados

### 4.2.1. Infraestructura

De manera global, se observó que el subsistema INFRAESTRUCTURA, que incluye la fabricación y transporte de los materiales que componen la estructura para entutorado de la parcela en el sistema de cultivo AL, los elementos de la estructura del invernadero, del sistema de nebulización y del sistema de fertirrigación, fue el subsistema que adquiere más importancia en las categorías HT, AR, GWP y PO. En el cultivo al aire libre, el porcentaje de impacto sobre estas categorías fue menor respecto a los cultivos bajo malla con y sin nebulización, pues sólo contribuyen la fabricación y transporte de los materiales que componen la estructura de entutorado de las parcelas y el sistema de fertirrigación. En cambio, M presentó los materiales de la estructura y cubierta del invernadero y sistema de fertirrigación, igual que MN, al que además se suman los materiales que componen el sistema de nebulización. Por ejemplo, un análisis más profundo de la contribución de la fabricación de los diferentes materiales, permite determinar aquellos que contribuyen mayoritariamente y en qué categoría en MN (figura13). En esta figura se presentan desglosados los diferentes materiales que componen el subsistema INFRAESTRUCTURA. Los valores expresan el porcentaje de impacto generado por los materiales y transporte sobre las distintas categorías consideradas, correspondientes a la producción de un kilogramo de judía verde en el cultivo MN (2008).





**Figura 13.** Contribución a las diferentes categorías de la fabricación y transporte de los materiales que componen la estructura y cubierta del invernadero de malla, el sistema de nebulización y el sistema de fertirrigación: *polipropileno (PP)*, *cloruro de polivinilo (PVC)*, *polietileno (PE)*, *hormigón* y *acero*. Los resultados están expresados en el indicador de la categoría por unidad de masa del material utilizado para la producción de un kilogramo de judía verde, UF



La contribución más alta de la INFRAESTRUCTURA en el sistema de cultivo MN sobre las categorías HT, AR, GWP y PO, se dió durante la fabricación de las estructuras de acero (postes, alambres, bombas de impulsión, etc.). HT fue la categoría que soporta el impacto más alto, alcanzando un 96,2% del total, debido a la emisión de Cromo VI, causante del 92,6% de la contaminación del procesado del acero. Le sigue la categoría PO con un 77,4% de impacto, ocasionado por la emisión de monóxido de carbono (88,5%). En las categorías AR y GWP la fabricación del acero contribuye con un porcentaje de impacto prácticamente igual para ambas (45% aproximadamente). La principal sustancia contaminante de AR fue el carbón (82,6%) y en cuanto a GWP, fue la emisión al aire de CO<sup>2</sup> en su totalidad, la sustancia que genera el impacto debido a la fabricación de estructuras de acero y al procesado del hormigón. El hormigón, junto a la fabricación de los materiales plásticos contribuyen al impacto en esta categoría con un 26,2% y 23,7% respectivamente. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Muñoz y col. (2007), dónde la categoría GWP adquiere el mayor impacto producido en la estructura de un invernadero de

plástico, debido, también, a las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de acero y hormigón.

Por ello, la reducción del impacto debido a la INFRAESTRUCTURA debería pasar por la mejora de la estructura, optimizando las dimensiones de los componentes de la misma e intentado reducir al máximo los materiales utilizados (plásticos, acero, hormigón...), empleando materiales reciclados y/o materiales con una vida útil más larga. Antón y col. (2005b) indican las mismas recomendaciones al obtener, en el subsistema INFRAESTRUCTURA, los valores de impacto más altos para las categorías GWP, AR, PO y AI, debido a los elementos que componen la estructura de un invernadero de plástico, así como la cubierta de plástico y equipos auxiliares (tuberías, goteros, etc.).

En la categoría AR, se produjo una importante contribución por parte de la fabricación de los materiales plásticos de polietileno (43,5%) especialmente por el consumo de petróleo (51,1%) y gas natural (43,6%). La instalación del sistema de fertirrigación, sistema de nebulización, estructura y material de cubierta del invernadero, comporta una necesidad de material plástico (PE), principal causante del incremento del uso de recursos en este subsistema. Por ello, se deberán buscar plásticos reciclados o de mayor duración.

El transporte está ligado a la localización de la producción y a la distancia de las fábricas que proporcionan la infraestructura. Este factor, a pesar de ser considerado por su efecto negativo en los ACVs (Jolliet, 1993; Jungbluth y col., 2000), en nuestro caso, no supone un impacto ambiental importante en las categorías estudiadas (4% en GWP), debido a la cercanía entre la zona de estudio y los lugares de origen de producción y fabricación de los elementos considerados en la INFRAESTRUCTURA del invernadero.

#### 4.2.2. *Control fitosanitario*

El subsistema CONTROL FITOSANITARIO, tiene mayor relevancia en los sistemas de cultivo al aire libre, ya que, en este caso, se realizó un control químico de plagas aplicándose plaguicidas de la familia de los organofosfatos y carbamatos, entre otros, cuyas materias activas son altamente tóxicas y perjudiciales para el entorno, pero dichos plaguicidas, son los empleados habitualmente por los agricultores de la zona. En los sistemas de cultivo M y MN, se llevó a cabo un control integrado de plagas y enfermedades del cultivo de judía verde siguiendo la normativa de producción integrada (Real Decreto 1201/2002, BOE núm. 287). En todos los sistemas, la categoría que soporta un mayor impacto provocado por el subsistema control fitosanitario fue la ODP, alcanzando el 21,9% en AL para el ciclo 2008 (figura 7). Como sustancias que contribuyen a este impacto se consideraron Halon

1211 (CF<sub>2</sub>ClBr) y Halon 1301 (CF<sub>3</sub>Br), con un 28,5% y 71,5% respectivamente en AL del ciclo 2008. La emisión de estas sustancias ocurre principalmente por la electricidad y diesel consumidos en la producción de plaguicidas. Sin embargo, y pese a no mostrarse en el presente trabajo, su aplicación adquiere importancia en las categorías de toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre y acuática, pues en trabajos precedentes se ha mostrado que su toxicidad supera los valores mostrados por otros subsistemas en estas tres categorías (Antón, 2004). Marucci y col. (2008), concluyeron que el impacto ambiental por el uso de fungicidas e insecticidas fue mayor para cultivos bajo invernadero plástico que al aire libre, registrándose una tendencia opuesta en cuanto al uso de herbicidas, con una mayor cantidad empleada bajo condiciones de aire libre. Dichos investigadores, recomiendan la adopción de una lucha más cuidadosa contra las plagas, principalmente en las zonas donde la vulnerabilidad de las aguas subterráneas es alta. En nuestro caso, el impacto ambiental por el empleo de los tres tipos de fitosanitarios (fungicidas, insecticidas y herbicidas) fue superior en AL, ya que se empleó lucha integrada en los sistemas de cultivo M y MN, reduciéndose en este caso el uso de productos químicos.

### 4.2.3. Fertilizantes

El mayor impacto provocado por los FERTILIZANTES se produjo en la categoría EI en todos los sistemas de cultivo (AL, M y MN), por la permanencia en el suelo de los nutrientes no utilizados por el cultivo. En AL el impacto por fertilizantes fue relativamente mayor al reducirse mucho el impacto de la estructura y no contar con el subsistema “gestión de la nebulización” (Romero-Gómez y col., 2009). El porcentaje de impacto mayor en el sistema de cultivo AL fue de 88,4% en 2008 y 87,6% en 2009 (figura 8). La emisión de fosfatos al agua contribuye a la carga ambiental de EI con un 99,2% (AL en 2008) del total de emisiones producidas. Estas emisiones pueden ser generadas, posteriormente al ciclo de cultivo, por lavados de nutrientes no utilizados por el cultivo, debido a la lixiviación hacia las capas más profundas, por las lluvias producidas durante otoño e invierno. Se deberá optimizar un manejo y uso más eficiente de los fertilizantes (Cowell, 1998), evitando la aportación en exceso de agua y fertilizantes; con ello, además, se aumenta el aprovechamiento de un recurso escaso como es el agua. Russo y col. (2008), obtuvieron valores más bajos para todos los índices medioambientales evaluados en la producción sin suelo de un cultivo ornamental a diferencia del cultivo en suelo, e indicaron la importancia de la productividad en sistemas cerrados, siempre que se integre con la desinfección de las soluciones nutritivas. Emplear un sistema de recirculación del agua de drenaje es una alternativa que nos permitiría reducir el

impacto, ya que, cuando el agua de drenaje es reutilizada se descargan menos sustancias minerales, lo que implicaría un menor uso de agua y fertilizantes (Nienhuis y col., 1996). Russo y De Lucia (2008), recomiendan la aplicación de métodos de evaluación de las necesidades nutritivas del cultivo mediante análisis de materia orgánica del suelo, macro y micronutrientes, análisis visual o químico de la parte foliar o análisis de conductividad del suelo, así como utilizar prácticas de riego adecuadas.

#### 4.2.4. *Fertirrigación*

En el manejo de la FERTIRRIGACIÓN resultó especialmente perjudicada la categoría AI en todos los sistemas de cultivo. Al igual que el subsistema FERTILIZANTES, los porcentajes de impacto mayores se producen en AL (36,4% en 2008 y 27,9% en 2009) (figuras 7 y 8) debido al mayor consumo de agua medio diario y fertilizantes. Las sustancias que contribuyen a este impacto fueron las emisiones al aire de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , siendo el amonio la emisión de mayor importancia en todos los sistemas de cultivo, generada por la fabricación de fertilizantes, principalmente el nitrato amónico. Las categorías GWP y ODP contribuyen con un porcentaje de impacto prácticamente igual para ambas (30% en 2008 y 20% en 2009, aproximadamente) en AL, como consecuencia también, de la fabricación de fertilizantes.

#### 4.2.5. *Gestión del cultivo y residuos*

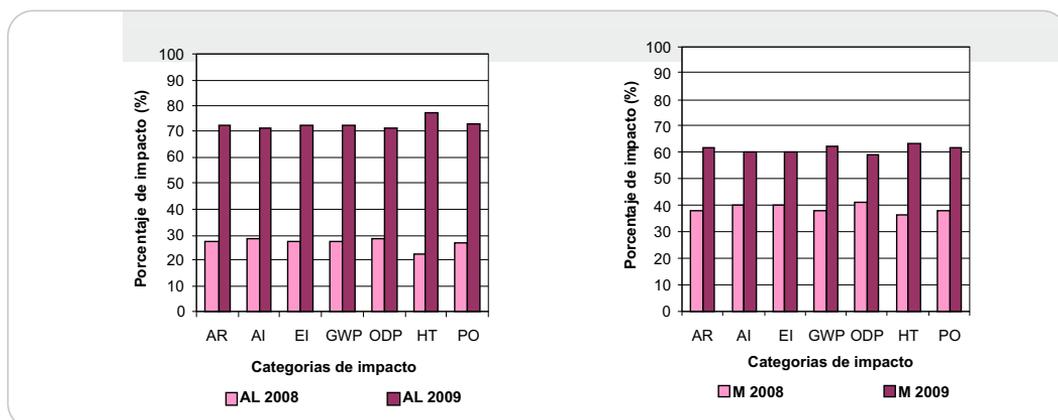
En cuanto a los subsistemas GESTIÓN DEL CULTIVO y RESIDUOS, el porcentaje de impacto en las diferentes categorías fue mínimo o nulo en todos los sistemas de cultivo y su efecto fue prácticamente despreciable frente al del resto de subsistemas. Tanto la GESTIÓN DEL CULTIVO (operaciones culturales) como los RESIDUOS producen el mayor impacto sobre la categoría ODP, con valores máximos de 6,3% y 12,8% respectivamente en AL (figura 8). El impacto sobre esta categoría se produce por las emisiones de Halon 1211 ( $\text{CF}_2\text{ClBr}$ ) y Halon 1301 ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ), provocadas por el consumo de electricidad y diesel de los vehículos y utensilios agrícolas empleados para las labores preparatorias del terreno, así como también, en la gestión y transporte de materiales plásticos y acero a plantas de reciclaje y residuos verdes y hormigón a vertedero. Bos y col. (2008), recomiendan el reciclado mecánico de los plásticos de uso agrícola, con un menor impacto ambiental en la categoría GWP, a diferencia de la incineración o gestión en vertedero. La separación de la fracción

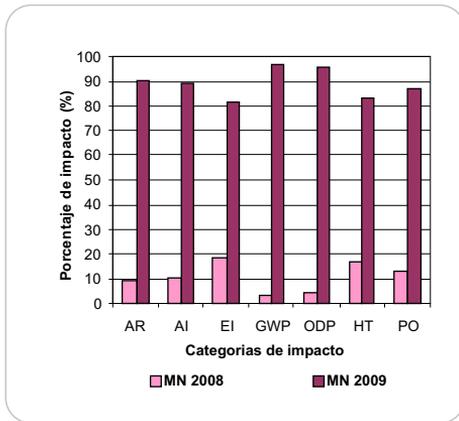
verde y su posterior compostaje es la mejor opción para gestionar estos residuos y mejorar el impacto ambiental para la mayoría de las categorías consideradas (Antón y col., 2005a y 2005b, Martínez-Blanco y col., 2009). El compostaje provoca menores impactos ambientales que la disposición en vertedero en categorías como calentamiento global (6,7-21,8 veces menor) y eutrofización (25,9-40,8 veces menor), ya que se evitan las emisiones de metano y los lixiviados (Núñez y col., 2008). Russo y De Lucia (2008), indican que el compostaje es el mejor modo de procesar los residuos orgánicos al permitir la recuperación del valor de los nutrientes y no repercutir negativamente en el entorno.

#### 4.2.6. Gestión de la nebulización

La GESTIÓN DE LA NEBULIZACIÓN ejerció una mayor presión ambiental en el sistema de cultivo MN en la categoría AI, 17,4% en el ciclo 2008 (figura 11), debido a sustancias contaminantes como los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) derivados de la energía consumida en el sistema de nebulización. Se deberán mejorar, por tanto, el diseño y las condiciones para maximizar la eficiencia de uso, así como seguir estudiando otras estrategias de manejo que impliquen menores tiempos de funcionamiento, manteniendo la calidad del fruto. Según Russo y col. (2008), se debería prestar mayor atención a la gestión del microclima en los invernaderos, teniendo mayor cuidado en el manejo de los recursos energéticos. En el ciclo 2009, al ser menor la producción, la presión ambiental que ejercen los materiales que componen la INFRAESTRUCTURA, superó la carga ambiental de la GESTIÓN DE LA NEBULIZACIÓN sobre las diferentes categorías.

En la figura 14, se comparan los dos ciclos estudiados (2008 y 2009) para cada uno de los sistemas de cultivo. El impacto producido en el ciclo 2009 fue siempre mayor que el producido por los diferentes subsistemas en 2008. Esto se debió a la producción de judía verde, que fue mayor en 2008 (aproximadamente el doble) que la obtenida en 2009, como se ha mencionado anteriormente.





**Figura 14.** Comparación de impactos ambientales para los ciclos de cultivo 2008 y 2009 y las diferentes categorías estudiadas: agotamiento de los *recursos abióticos* (AR), *acidificación del aire* (AI), *eutrofización* (EI), *calentamiento global* (GWP), *destrucción del ozono estratosférico* (ODP), *toxicidad humana* (HT) y *oxidación fotoquímica* (PO), en los tres sistemas de cultivo: *aire libre* (AL), *bajo invernadero de malla* (M) y *bajo invernadero de malla con sistema de nebulización* (MN)

### 4.3. Comparación de los tres sistemas de cultivo

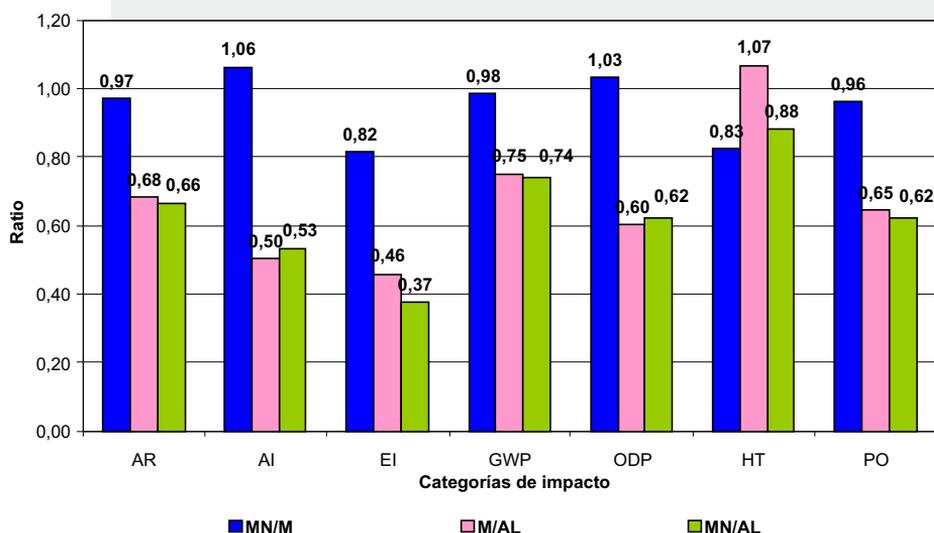
Para comparar los tres sistemas de cultivo, se calcularon los ratios entre los impactos ambientales de cada categoría (figura 15). Esta comparación la realizamos sólo para el ciclo 2008, ya que la producción obtenida en 2009 no fue representativa de un ciclo de cultivo característico de la zona.

Si comparamos los sistemas de cultivo bajo malla, observamos que en las categorías AI y ODP el ratio MN/M fue ligeramente superior a la unidad, lo que indica un mayor impacto del sistema MN sobre ellas. Esto fue principalmente debido a la carga ambiental adicional que supone el sistema y gestión de la nebulización. El ratio MN/M alcanzó el valor más alto en la categoría AI, debido a sustancias contaminantes ( $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ ) derivadas de la energía consumida en el sistema de nebulización. En el resto de categorías, el valor del ratio MN/M fue siempre menor a la unidad, indicando un mayor impacto del sistema de cultivo M, debido a la mayor producción (UF) obtenida en MN.

Si la comparación la realizamos entre M y AL, se observa que el ratio M/AL siempre es menor que 1, excepto para la categoría HT. Por tanto, el impacto de M siempre es menor que el de AL, excepto en esta categoría, debido al peso del impacto de los materiales que constituyen la estructura del invernadero, principalmente por el procesado y fabricación de estructuras de acero. La tendencia en los ratios MN/AL fue similar a la de M/AL en todas las categorías (impacto de AL mayor que el de MN), excepto en HT, donde el ratio M/AL fue mayor (1,07) que MN/AL (0,88), debido al mayor rendimiento en MN que en M. Desde un punto de vista productivo, la producción en AL debería ser superior a la obtenida en nuestro estudio para conseguir un impacto ambiental por

al generado por M y MN. Muñoz y col. (2007) y Núñez y col. (2008), obtuvieron resultados similares en ensayos con sistema de cultivo al aire libre e invernaderos de plástico, y observaron que, para la mayoría de las categorías, el sistema de cultivo al aire libre muestra un mayor impacto ambiental debido a la menor producción obtenida respecto a la producción en invernadero. Se debe considerar que para la obtención al aire libre de una producción similar a la obtenida bajo malla, sería necesario cultivar una superficie mayor, ampliando la estructura del entutorado e incrementado la energía consumida en el sistema de fertirrigación y laboreo del suelo, fertilizantes y plaguicidas, consumo de agua y gestión de residuos.

Soriano y col. (2005), concluyeron al comparar un invernadero de plástico equipado con sistemas de climatización frente a uno tipo “parral” mejorado sin climatización activa, que el primero puede ser aceptable frente al segundo, desde el punto de vista ambiental, siempre que se incremente la producción en unas cantidades mínimas. En nuestro caso, el sistema de nebulización respecto a M estaría justificado desde el punto de vista ambiental siempre y cuando exista un determinado aumento de producción.



**Figura 15.** Ratios M/MN, M/AL y MN/AL (ciclo 2008) para las diferentes categorías de impacto: *agotamiento de los recursos abióticos (AR), acidificación del aire (AI), eutrofización (EI), calentamiento global (GWP), destrucción del ozono estratosférico (ODP), toxicidad humana (HT) y oxidación fotoquímica (PO)*

Los valores absolutos de impacto por categorías para cada sistema de cultivo y ciclo, se muestran en la tabla 22. Las categorías AR y AI, adquieren valores hasta 10 veces superiores en AL respecto a M y MN en 2008. Esto fue debido a que el uso de fertilizantes y el consumo de agua de riego fue mayor en el aire libre que en los sistemas de cultivo bajo malla, además al reducirse el impacto de la estructura y no tener sistema de nebulización, en AL el impacto relativo por fertilizantes se hizo mayor. EI, ODP y PO también adquieren valores superiores en AL, aproximadamente el doble respecto a M y MN en 2008. La emisión de fosfatos al agua en AL contribuye de forma mayoritaria a la carga ambiental de EI en todos los casos. Además, en AL se empleó un mayor número de plaguicidas, por ello la categoría ODP tiene un mayor impacto en este sistema de cultivo, debido a la emisión de sustancias como Halon 1211 (CF<sub>2</sub>ClBr) y Halon 1301 (CF<sub>3</sub>Br), producida por la electricidad y diesel consumidos en la producción de plaguicidas. La tendencia para EI fue similar en 2009, sin embargo, en ODP y PO el sistema de cultivo MN generó un mayor impacto. Esto fue debido a la menor producción obtenida en este ciclo. En cuanto a GWP, adquiere valores de impacto más altos para MN en ambos ciclos. La sustancia que generó este alto impacto fue la emisión al aire de CO<sub>2</sub>, debido a la fabricación de estructuras de acero, al procesado del hormigón y a la fabricación de los materiales plásticos que constituyen la INFRAESTRUCTURA en MN. La categoría HT soporta un mayor impacto en M (2009) y MN (2008) debido a la emisión de Cromo VI, causante de la contaminación del procesado del acero.

**Tabla 22.** Valores absolutos de los potenciales impactos ambientales del cultivo al aire libre (AL), bajo invernadero de malla (M) y bajo invernadero de malla con nebulización (MN) resultantes del análisis del ciclo de vida completo durante los ciclos 2008 y 2009

Categorías de impacto	Unidades de medida	AL		M		MN	
		2008	2009	2008	2009	2008	2009
AR	Kg Sb eq.	1,25E-03	3,26E-03	8,49E-04	1,39E-03	8,25E-04	7,58E-03
AI	kg SO <sub>2</sub> eq	1,32E-03	3,26E-03	6,59E-04	9,95E-04	7,01E-04	5,90E-03
EI	kg PO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> eq	6,97E-04	1,86E-03	3,19E-04	4,78E-04	2,61E-04	1,13E-03
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	1,36E-01	3,56E-01	1,02E-01	1,69E-01	1,01E-01	2,89E+00
ODP	kg CFC-11 eq	7,70E-09	1,91E-08	4,64E-09	6,70E-09	4,79E-09	9,68E-08
HT	kg 1,4-DB eq	9,32E-02	3,23E-01	9,96E-02	1,74E-01	8,22E-02	4,11E-01
PO	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6,00E-05	1,64E-04	3,88E-05	6,28E-05	3,73E-05	2,48E-04

## 5. Conclusiones

-Debido al mayor impacto que ejercen los materiales que componen la infraestructura, la presión ambiental que produce respecto al resto de subsistemas en todas las categorías es muy alta. Por tanto, la reducción del impacto por la infraestructura debe considerarse prioritaria en la mejora ambiental del cultivo en invernadero de malla, mediante la utilización de materiales reciclados o de mayor duración y la optimización de las dimensiones de las estructuras. Hay que tener en cuenta que el resto del proceso es energéticamente muy limpio.

- Se deberían ajustar los aportes de nutrientes en la fertirrigación, optimizando el manejo y el uso de los fertilizantes y el riego para evitar la aportación en exceso que permanezca en el suelo una vez finalizado el cultivo y sea lixiviado posteriormente con el agua de lluvia en los periodos del ciclo donde no hay cultivo. Con ello, además, se aumenta el aprovechamiento de un recurso escaso como es el agua.

- La adopción de sistemas de climatización como la nebulización (que incrementan el consumo de agua y electricidad) en las condiciones del estudio, estaría justificada desde el punto de vista ambiental siempre y cuando suponga un determinado aumento en producción. Además, es necesario estudiar estrategias de manejo que impliquen menores consumos de agua.

- Desde un punto de vista productivo, la producción en AL debería ser muy superior a la obtenida para justificar el impacto ambiental generado frente a M y MN. El sistema de cultivo al aire libre muestra para la mayoría de las categorías, un mayor impacto ambiental debido a la mayor producción obtenida en el cultivo bajo invernadero.

- En el ciclo 2009 tuvieron lugar unas condiciones climatológicas extremas. Esto nos ha permitido hacer un ACV durante dos años con diferentes condiciones climáticas. Todos los sistemas de cultivo tuvieron un mayor impacto que sus homónimos en 2008 debido a que la unidad funcional

seleccionada (producción de judía verde por superficie) fue bastante mayor en 2008 que la obtenida en 2009, por lo que las cargas ambientales generadas para producir 1 kilogramo de judía verde, se han repartido entre una mayor cantidad de judías verdes producidas. Es importante alcanzar, por tanto, un nivel mínimo de producción para justificar los impactos ambientales de los distintos sistemas de cultivo.

- La realización de este estudio demuestra la viabilidad de aplicación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida para el estudio de los impactos ambientales derivados de un proceso agrícola, y puede extenderse a explotaciones hortícolas protegidas bajo malla o al aire libre.

## 6. Bibliografía

Antón, A. 2004. Utilización del Análisis del Ciclo de Vida en la Evaluación del Impacto ambiental del cultivo bajo invernadero Mediterráneo. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. 229 pp.

Antón, A., Montero, J.I., Muñoz, P., Castells, F. 2005. Identification of the Main Factors Affecting the Environmental Impact of Passive Greenhouse. International Symposium: "Greensys" Sustainable Greenhouse Systems. Leuven, Belgium. *Acta Horticulturae* 691: 489-494.

Antón, A., Muñoz, P, Castells, F, Montero, J.I., Soliva, M. 2005a. Improving waste management in protected horticulture. *Agronomy Sustainable Development* 25: 447-453.

Antón, A., Montero, J.I., Muñoz, P. 2005b. LCA and tomato production in Mediterranean greenhouses. *International Journal Agricultural Resources Governance and Ecology* Vol. 4, Nº2: 102-112.

Audsley, E. 1997. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for agriculture. Final Report Concerted action AIR3-CT94-2028. European Commission DG VI Agriculture UK, 101 pp.

184 Bentrup, F. and Küsters, J. 2000. Methods to estimate to potential N emissions related to crop production. In: *Agricultural data for life cycle assessments*, Weidema, B., Meeusen, M. eds. The Hague: 133-151.

Bentrup, F., Kusters, J., Kuhlmann, H., Lammel, J. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology. I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. *European Journal of Agronomy* 20: 247-264.

Bos, U., Makinshi, C., Fischer, M. 2008. Life Cycle Assessment of common used agricultural plastic products in the E.U. *Acta Horticulturae* 801: 227-236.

Bouwman, A.F. 1995. Compilation of a global inventory of emissions of nitrous oxide. Ph.D. thesis, University of Wageningen.

Bussink, D.W. 1996. Ammonia volatilisation from intensively managed dairy pastures. Ph.D. thesis, University of Wageningen.

Casas, A. 1999, Cultivos sin suelo II. Curso Superior de Especialización. Vol. 5: 257-266.

CML, C.o.E.S. 1992. Environmental life cycle assessment of products. Guide and Backgrounds. Leiden University, The Netherlands.

Commission of the European Communities. 1999. Directions towards sustainable agriculture. COM (1999) 22 final. Commission of the European Communities, Brussels.

Cowell, S.J., Clift, R. 1997. Impact Assessment for LCAs Involving Agricultural Production. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2 (2): 99-103.

Cowell, S.J. 1998. Environmental Life Cycle Assessment of Agricultural Systems: Integration Into Decision-Making. Ph. D. thesis, University of Surrey, Guildford.

Cuenca, R.H. 1989. Irrigation system design: An engineering approach. Prentice Hall, New Jersey. 552 pp.

ECETOC. 1988. European Chemical Industry Ecology & Toxicology Centre (ECETOC), 1988. Nitrate and Drinking Water. Technical Report Nº 27. ECETOC, Brussels.

ECETOC. 1994. European Chemical Industry Ecology & Toxicology Centre (ECETOC), 1994. Ammonia Emissions to Air in Western Europe. Technical Report N° 62. ECETOC, Brussels.

Ecoinvent system process v. 2.0. 2007.

Esser, P., Voet, E.V.D., Van der Voet, E. 1998. Proposal for a method aiming at the quantification of the impact of wood extraction in life cycle assessment. Document International Research Group on Wood Preservation. 15 pp.

Google Maps: <http://maps.google.com>

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Brijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. J., Lindeijer, E., Roorda, A. A. H. y Weidema, B. P. 2001. Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standars. Part 1 and 2. Ministry of Housing. Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML). Den Haag and Leiden, The Netherlands.

Guinée, J.B., M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, K. R., A. de Koning, Wegener Sleeswijk A., S. Suh, H. Udo de Haes, H. Bruijn, R.v. Duin, and M.A.J. Huijbregts. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Heller, M., Cashman, S., Dick, K., Przybylo, D., Walter, W., Keoleian, G. 2008. Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of a large-scale vertically integrated organic dairy in the U.S. Proc. Of 6th Int. Conf. on LCA in the Agri-Food Sector, Zurich, November 12-14: 286-294.

Higham, R.K., Todd, J.J. 1998. Life-cycle assessment and its relevance to Australian forestry and wood product industries. Australian Forestry 61: 65-69.

IPPC. 1997. Intergovernmental Panel on Climate Change, Guidelines for national greenhouse gas inventories. OECD. París.

ISO 14040. 1997. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14040. Geneva.

ISO 14041. 1998. Environmental management-Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory analysis. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14041. Geneva.

ISO 14042. 2000. Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle impact assessment. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14042. Geneva.

ISO 14043. 2000. Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle interpretation. International Organisation for Standardisation ISO. International standard. 14043. Geneva.

Jolliet, O. 1993. Bilan écologique de la production de tomates en serre. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic* 25 (4):261-267. En: Antón, A., 2004. Utilización del Análisis del Ciclo de Vida en la Evaluación del Impacto ambiental del cultivo bajo invernadero Mediterráneo. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Jungbluth N., Tietje O., Scholz, R.W. 2000. Food Purchases: Impacts from the Consumers Point of View Investigated with a Molecular LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 5(3): 134-142.

Kaiser, E.A., Eiland, F., Germon, J.C., Gispert, M.A., Heinemeyer, O., Henault, C., Lind, A.M., Maag, M., Saguer, E., Van Cleemput, O., Vermoesen, A., Webster, C. 1996. What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils. *Pflanzenernahr Boden* 159: 541-547.

Kroeze, C. 1994. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O)-emission inventory and options for control in the Netherlands. RJVM Report N° 773001004. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Bilthoven.

Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Anton, A., Rieradevall, J. 2009. Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops. *Resources Conservation and Recycling* 53(6): 340-351.

Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A., Rieradevall, J. 2010. Environmental impacts of tomato production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse with compost and mineral fertilizers in a Mediterranean region. *Journal of Cleaner Production* (accepted).

Marucci, A., Pagniello, B., Campiglia, E., Roupael, Y., Colla, G. 2008. Environmental impact of pesticides in vegetable crop production under the mediterranean climate of central Italy. *Acta Horticulture* 801: 1583-1590.

Mattsson, B. 1999. Life cycle assessment (LCA) of carrot puree: case studies of organic and integrated production.

Milà, L. 2003. Contributions to Life Cycle Analysis for Agricultural Systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment. Tesis doctoral, Universitat Autònoma, Bellaterra.

Mourad A.L., Coltro L., Oliveira PAPLV., Kletecke, R.M., Baddini JPAO. 2007. A simple methodology for Elaborating the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. *Int J LCA* 12 (6) 408-413.

Muñoz P., Antón A., Nuñez M., Paranjpe, A., Ariño, J., Castells, X., Montero, J.I., Rieradevall, J. 2007. Comparing the environmental impacts of greenhouse versus open-field tomato production in the Mediterranean region. *Acta horticulturae* 801:1591-1597.

Nemecek, T., and S. Erzinger. 2005. Modelling Representative Life Cycle Inventories for Swiss Arable Crops. *Journal of the International Life Cycle Assessment* 10: 1-9.

Nienhuis, J.K., P.J.A.d. Vreede, P.J.A. De Vreede, and R.G. Brumfield. 1996. Utility of the environmental life cycle assessment method in horticulture. *Proceedings of the XIIIth International Symposium on Horticultural Economics* 429: 531-538.

Núñez, M., Martínez, J., Muñoz, P., Antón, A., Rieradevall, J. 2008. Estudios preliminares de evaluación de impacto ambiental global en la aplicación de compost como fertilizante en cultivos de tomate al aire libre y en invernadero. I Jornadas de la red española de compostaje, Barcelona, 6-9 Febrero 2008.

OTA (Organic Trade Association). 2007. "2007 Manufacturer Survey Overview"  
<http://www.ota.com/pics/documents/2007ExecutiveSummary.pdf>, accessed April 15, 2008.

Pimentel, D. 1980. Handbook of energy utilization in agriculture. CRC Press. 475 pp.

Real Decreto 1201/2002, de 20 de noviembre (BOE núm. 287 de sábado 30 noviembre 2002), por el que se regula la producción integrada de productos agrícolas.

Richter, K. and Gugerli, H. 1996. Wood and timber derived products in comparative life cycle assessment studies. *Holz als Roh und Werkstoff* 54: 225-231.

Romero Rodríguez, B.I. 2003. El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín II E*: 91-97.

Romero-Gámez, M., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N., Soriano, T., Casadesus, J., Antón, A., Montero, J.I. 2008. Refrigeración activa en invernaderos de malla para producción hortícola protegida en el periodo estival. *Horticultura* 207: 12-22.

Romero-Gámez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N. 2009a. Impactos ambientales del cultivo de judía verde. *Horticultura Internacional* 69: 12-19.

Romero-Gámez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N. 2009b. Environmental impact of greenbean cultivation: Comparison of screen greenhouses vs. open field. *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.7 (3&4): 754-760.

Russo, G., Magnozza, G.S., De Lucia, B. 2008. Environmental improvements of greenhouse flower cultivation by means of LCA methodology. *Acta Horticulturae* 801: 301-305.

Russo, G. and De Lucia, B. 2008. Environmental evaluation by means of LCA regarding the ornamental nursery production in rose and sowbread greenhouse cultivation. *Acta Horticulturae* 801: 1597-1604.

SETAC. 1993. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice".

Stanhill, G. 1980. The energy cost of protected cropping: A comparison of six system of tomato production. *Journal Agricultural Engineering Research* 25: 145-154.

SimaPro v. 7.1. 2007.

Sommer, S.G. 1992. Ammonia volatilization from cattle and pig slurry during storage and after application in the field. Ph.D. thesis, University of Copenhagen.

Soriano, T., Montero, J.I., Escobar, I., Antón, A., Muñoz, P., Romacho, I., Hita, O., Morales, M.I., Hernández, J., Castilla, N. 2005. Environmental life cycle assessment of two greenhouse production systems for mediterranean climate conditions. In: *Innovation by Life Cycle Management*. Barcelona: 372-375.

UN-DSD (United Nations Division for Sustainable Development). 2000. Agenda 21. Chapter 14: Promoting sustainable agriculture and rural development. United Nations (UN), New York.

Van Worden, S. 2001. The application of Life Cycle Analysis in glasshouse horticulture. En: *International Conference LCA in Foods* (Ed), Gothenburg 136-140.

Vía Michelin: <http://www.viamichelin.com>

Wegener Sleeswijk, A., R. Kleijn, H. van Zeitjs, J.A.W.A. Reus, H. Meusen van Onna, H. Leneman, and H.H.W.J.M. Sengers. 1996. Application of LCA to Agricultural Products CML report 130. Centre of Environmental Science Leiden University (CML), Centre of Agriculture and Environment (CLM), Agricultural-Economic Institute (LEI-DLO), Leiden.

Weidema, B.P., Mortensen, B., Nielsen, P., Hauschild, M. 1996. Elements of an Impact Assessment of Wheat Production. Institute for Product Development 12. Technical University of Denmark. Denmark.

Weidema, B.P. and Meeusen, M.J.G. 2000. Agricultural data for Life Cycle Assessment, Report 2.00.01, Agricultural Economics Research Institute (LEI), Hague, Netherlands, Vol 1: 195 and Vol 2: 155.

# FASE II

CARACTERIZACIÓN DE MALLAS Y MODELIZACIÓN DE  
ESTRUCTURAS PARA MALLAS

---



Los resultados que se presentan en la fase II se publicarán en la siguiente revista:

AUTORES: M. Romero-Gómez, E. M. Suárez-Rey, N. Castilla and T. Soriano

TÍTULO: Evaluation of global, PAR and diffusive of agricultural screens

AÑO: 2010

REVISTA: Biosystems Engineering Journal (enviado)



**CAPÍTULO 4.**  
CARACTERIZACIÓN TRANSMISIVA  
A RADIACIÓN SOLAR DE MATERIALES DE  
CUBIERTA Y CERRAMIENTO PARA  
INVERNADEROS DE MALLA

---





# 1. Introducción

En los últimos años, el cultivo bajo malla en primavera-verano de ciertas especies hortícolas (tomate tipo cereza, judía verde, etc.) se ha convertido en una alternativa socioeconómica de interés para comarcas interiores deprimidas, constituyendo un complemento a la campaña productiva de los invernaderos de litoral. Por ello, el establecimiento de estructuras con cubierta de malla para cultivos estivales se ha extendido en estas zonas.

Bajo la malla se produce una reducción de radiación, una ralentización en el flujo de aire y un aumento de la higrometría, limitando el estrés hídrico generado por las altas temperaturas estivales (Möller y col., 2003; Romacho y col., 2006). La reducción de la radiación solar inducida por los sistemas de cubierta de malla, se puede considerar como un efecto positivo de las instalaciones de sombreado, mientras que, para otras aplicaciones agrícolas, como anti-insectos (en ventanas de invernaderos de plástico) o anti-granizo (en frutales), podría ser considerada un efecto negativo (Castellano y col., 2008b). En ambos casos, es importante evaluar el efecto de sombreado de las mallas empleadas.

## 1.1. Mallas plásticas

Actualmente existe en el mercado una enorme variedad de materiales de cerramiento de estructuras para el cultivo protegido, tanto para túneles bajos como para macrotúneles e invernaderos. Estas láminas deben ser transmisivas a la radiación solar, es decir, traslúcidas, en mayor o menor grado, para permitir el crecimiento de las plantas que se ubiquen bajo ellas.

Las mallas se caracterizan por la porosidad que determina el factor de sombreado y la permeabilidad al aire. Esta porosidad viene determinada por el grosor del hilo y sus características físicas, así como por la densidad de la malla (número de hilos por centímetro), que también van a determinar la durabilidad de la malla, peso, resistencia a rotura y elasticidad (Castellano y col., 2006). La materia prima más empleada para mallas agrícolas es polietileno de alta densidad (HDPE de densidad  $0,94-0,96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); el polipropileno (PP) también se usa como materia prima para mallas pero, más frecuentemente, para la fabricación de láminas no tejidas (filamentos termosoldados de PP, más conocidos como agrotexil) (Castellano y Russo, 2005). Las mallas tienen una estructura regular con orificios cuadrados o rectangulares. En Europa, las mallas se caracterizan generalmente por el número de espacios (hilos) por centímetro en cada dirección (por ejemplo, una malla 10 x 20 tiene 10 espacios (hilos) en una dirección y 20 espacios (hilos) en otra) (Teitel, 2006).

Las mallas de hilo negro han sido las cubiertas más comunes empleadas para estructuras de sombreado. Sin embargo, el uso de hilos transparentes y coloreados se está incrementando debido a la modificación de la radiación del sol inducida por el color de la malla y porque consiguen mejorar el impacto estético en el paisaje rural (Castellano y col., 2008b). Algunos autores consideran el comportamiento radiométrico de la malla negra como “mecánico” debido a que los hilos de la malla son completamente opacos y absorben todas las longitudes de onda, por lo que la radiación solar incidente no es modificada por la malla (Castellano y col., 2008b).

Durante los últimos años, algunos investigadores han desarrollado un nuevo concepto, emplear la malla para la modificación específica de la luz del sol mediante el color de la misma, al mismo tiempo que mejorar el microclima y proporcionar la protección física deseada (Shahak y col., 2002). El empleo de mallas de colores provoca una diferenciación espectral en la radiación solar incidente. De hecho, la malla puede modificar los rangos del espectro visible y/o UV o IR, para producir una respuesta fisiológica del cultivo, como por ejemplo, maduración temprana o tardía. Varios estudios (Shahak, 2007 y Shahak y col., 2007) muestran que bajo mallas de color se observa un notable aumento de la productividad, reducción del estrés, mejora de la vitalidad del dosel vegetal, de la maduración y el color del fruto, del tamaño y calidad, así como reducción de cicatrices externas, quemaduras, etc.

Algunos investigadores (Baraldi y col., 1998) han mostrado que la banda roja y azul puede influir en el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Las mallas rojas reducen la radiación solar incidente, por encima del rango 400 nm a 600 nm. Este efecto reduce el ratio entre la radiación en los

rangos azul, verde y amarillo y la radiación en el rango rojo, comparado con la radiación solar natural. El cultivo reacciona con un aumento en el desarrollo de la superficie de la hoja, un alargamiento de los entrenudos y una floración y maduración tempranas. Las mallas azules, reducen la radiación en el rango 620 nm a 760 nm, mientras que la reducción es menos evidente en el rango 440 nm a 490 nm. Este efecto ralentiza el crecimiento de los cultivos, acorta los entrenudos y da lugar a plantas con un desarrollo compacto (Baraldi y col., 1998). En conclusión, en cultivos bajo mallas fotoselectivas destaca la importancia del tipo de luz generado bajo la sombra.

## 1.2. La radiación solar

Con cielo despejado, la cantidad de energía solar que llega a un punto de la superficie terrestre depende de la posición del sol, que varía con la latitud, época del año y hora del día, además de las condiciones de nubosidad y turbidez (Castilla, 2007). La posición del sol en cada momento viene dada por sus coordenadas: elevación solar ( $h$ ) y azimut. El ángulo azimutal se mide desde el sur y se considera negativo hacia el oeste y positivo hacia el este. El cénit es el punto del firmamento situado en la vertical que pasa por la cabeza del observador situado en un punto dado. El ángulo cenital ( $\theta$ ) es el formado por la vertical al cénit y la línea de los rayos solares, de modo que:  $(h + \theta = 90^\circ)$  (Dufie y Beckman, 1980).

La radiación solar no es uniforme a lo largo de su espectro, sino que varía la intensidad de cada tramo de longitud de onda diferente. La luz es una porción de la radiación solar y afecta a los distintos procesos biológicos en función de la longitud de onda recibida por la planta (Seemann y col., 1979). La radiación solar incidente está compuesta por radiación solar directa, radiación circumsolar y radiación difusa.

*La radiación directa* procede directamente del disco solar, sigue una trayectoria en línea recta (con mínimas desviaciones al atravesar la atmósfera terrestre), es decir, sigue una dirección (proveniendo del sol) determinada por la latitud, día del año y hora del día. Fuera de la atmósfera terrestre la radiación solar es sólo directa.

*La radiación circumsolar* representa la radiación procedente de la región próxima al sol. En la práctica, la radiación circumsolar se considera conjuntamente con la radiación solar difusa, debido a que el método de medida empleado integra ambas (Day y Baille, 1999).

*La radiación difusa* procede de todas las direcciones del conjunto de la bóveda celeste, 199

debido a las reflexiones, desviaciones y dispersiones provocadas por las nubes, gases y aerosoles de la atmósfera (Hanan, 1998).

Se define la *radiación global* o total como la suma de radiación directa y radiación difusa. La radiación global diaria varía con la latitud del lugar, con mayores diferencias en invierno que en verano. Así mismo, varía en el tiempo a lo largo del año, dependiendo de la irradiancia (intensidad de la radiación) y de la longitud del día, siendo mayor en los meses de verano que en los de invierno. La radiación solar global se cuantifica por su irradiancia o intensidad de radiación solar (flujo energético instantáneo) en  $W \cdot m^{-2}$ . La cantidad de radiación solar global recibida o acumulada en un periodo suele expresarse en  $MJ \cdot m^{-2}$ .

La nubosidad, la turbidez y la transparencia de la atmósfera tienen una gran influencia en las proporciones de radiación directa y difusa, al igual que la elevación del sol. La “turbidez” de la atmósfera contribuye a aumentar la proporción de radiación difusa en detrimento de la radiación directa. En días completamente cubiertos la radiación incidente es únicamente difusa debido al efecto de las partículas de vapor de las nubes sobre la radiación solar. En los días despejados la radiación solar difusa constituye sólo una pequeña parte de la radiación, estando la mayor parte constituida por radiación solar directa. Cuando la elevación del sol es pequeña, en un día soleado, puede prevalecer la radiación difusa, debido al gran espesor de la capa atmosférica que la radiación tiene que atravesar.

Se denomina radiación fotosintéticamente activa (*PAR*) a la radiación en longitudes de onda útiles para la fotosíntesis de las plantas. Se acepta que PAR abarca desde 400 a 700 nm (McCree, 1972), aunque algunos autores incluyen en PAR desde 350 hasta 850 nm. La composición de la radiación varía en el tiempo, en función de la elevación del sol y de la nubosidad que reduce la cantidad de energía, disminuyendo la radiación infrarroja corta. La proporción de PAR respecto a la global aumenta con la difusión (Castilla, 2007). Los valores de radiación global se miden, por convención, sobre una superficie horizontal, admitiéndose como norma general que el 48% de la radiación global es de tipo PAR (Hanan, 1998). La radiación PAR puede cuantificarse por su intensidad en unidades energéticas o irradiancia fotosintética por unidad de superficie ( $W \cdot m^{-2}$ ) o en unidades fotónicas también por unidad de superficie (moles de fotones  $\cdot m^{-2}$ ). La transmisividad a radiación PAR (400-700nm) es la propiedad radiométrica más importante de los materiales de cubierta desde el punto de vista agronómico, ya que es necesaria para la fotosíntesis de las plantas.

El efecto positivo de la radiación difusa en el comportamiento del cultivo es patente, tanto en cultivos al aire libre como en cultivos protegidos (Stanhill y Cohen, 2001), y tiene interés en la

producción bajo invernadero (Hemming y col., 2006; Jongschaap y col., 2006) y en estudios de producción neta de la masa forestal (Roderick y col., 2001; Gu y col., 2002).

Las ventajas de la luz difusa son claras: 1) Aumenta la uniformidad de la distribución espacial de la radiación dentro del invernadero (Dayan y col., 1986; Kurata, 1992), con efectos beneficiosos en la homogeneidad de las plantas en la cosecha (Adams y col., 2000). Este aspecto se considera uno de los elementos claves en la evaluación de la “calidad” de los materiales de cubierta (Mermier y Baille, 1980). 2) Mejora la eficiencia de uso de la radiación, pues la radiación difusa penetra mejor entre la vegetación por su carácter adireccional ( Cockshull y col., 1992; Baille, 1999; Gu y col., 2002). Estas ventajas son especialmente atractivas en los países del Mediterráneo, que cuentan con un gran número de días despejados.

Modelos y estudios experimentales han demostrado que cultivos tales como frutas, hortalizas con un alto dosel vegetal, así como ornamentales con un pequeño dosel vegetal pueden utilizar la luz difusa mejor que la luz directa. En el caso del pepino, la luz difusa es absorbida en mayor grado en las capas medias de las hojas, produciendo una mayor tasa fotosintética (Hemming y col., 2008). Existen indicios de que las plantas han desarrollado mecanismos para utilizar luz difusa más eficientemente (DeLucia y col., 1996; Vogelmann y col., 1996)

### 1.3. Transmisividad a la radiación solar de las mallas plásticas

Llamamos *transmisividad* a la radiación solar de un material a la proporción de radiación solar incidente que atraviesa dicho material. Esta transmisividad, además de depender del tipo de radiación incidente (directa o difusa) y del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie del tejido, también depende de la estructura y características del material (composición, porosidad, color, diámetro y forma del hilo) (Soni y col., 2005; Soriano y col., 2006; Sica y Picuno, 2008) y de las propiedades de absorbancia y reflectancia de la malla. Cuanto mayor sea la perpendicularidad del rayo solar incidente (en caso de radiación directa) mayor será la radiación transmitida (y, por tanto, su transmisividad). Al crecer el ángulo de incidencia (rayos más oblicuos) disminuirá la transmisividad. En condiciones de radiación difusa, al ser esta adireccional, la transmisividad, previsiblemente, no variará con el ángulo de incidencia para un material concreto.

Como hemos indicado, el efecto positivo de la radiación difusa en el comportamiento del cultivo es patente. Es por esto que, según lo declarado por Cabrera y col., 2009, desde los trabajos pioneros de Deltour y Nisen (1970), los estudios en laboratorio encaminados a la caracterización de

la dispersión de materiales de cubierta de invernaderos han recuperado su interés (Pearson y col., 1995; Wang y Deltour, 1999; Montero y col., 2001; Pollet y col., 2005). Esta dispersión de la radiación directa incidente bajo materiales de cubierta de cristal y plástico, se incrementa debido a factores intrínsecos del material como son: la rugosidad, la heterogeneidad del grosor de la lámina (Pollet y col., 2005) y la adición de partículas durante el proceso de fabricación (Basiaux y col., 1973; Raviv y Allingham, 1983; Pearson y col., 1995; Espi y col., 2006). Así, la radiación difusa representa una fracción importante de la radiación global solar que entra en el invernadero (Baille y Tchamitchian, 1993).

Esta cantidad de radiación difusa interior al invernadero se ve también afectada por factores extrínsecos, tales como la condensación y deposición de polvo en la cubierta, el envejecimiento del material plástico y el diseño del invernadero. Se han realizado pocos estudios detallados para caracterizar la radiación difusa bajo condiciones de invernadero (Basiaux y col., 1973; Burek y col., 1989) y se dispone de poca información sobre este componente, y de su proporción con respecto a la componente directa (Baille y Tchamitchian, 1993; Hanan, 1998). La mayoría de los estudios realizados *in situ*, han caracterizado la radiación solar global exterior e interior con el fin de obtener una transmisividad a radiación global, la cual suministra poca información acerca de las propiedades difusivas del material de cubierta.

Medidas espectralradiométricas han demostrado que los films de gran poder de difusión pueden inducir a valores de radiación global transmitida más bajos (Pollet y col., 2005). Sin embargo, esta reducción de transmisividad es mayor para la radiación solar global que para la radiación fotosintéticamente activa, probablemente debido al hecho de que la cantidad de radiación difusa disminuye al aumentar la longitud de onda (Pollet y col., 2005). El interés de estos materiales, por tanto, existe siempre que no conlleve una reducción relevante de la transmisividad global.

La radiación difusa dentro de un invernadero puede estimarse conociendo las condiciones de radiación exterior y dos parámetros: el coeficiente de enriquecimiento en radiación difusa ( $D_i/D_o$ ) y el factor de conversión ( $\tau_{b-d}$ ) de radiación directa en difusa (Baille y col., 2003), que dependen principalmente del material de cubierta y de las características del invernadero.

$$\tau_{b-d} = D^*/I_o = (D_i - \tau_d D_o)/I_o$$

Ecuación 1

Siendo:

$D^*$  = Cantidad de radiación solar directa convertida en difusa dentro del invernadero

$I_o$  = Radiación solar directa en el exterior

$D_i$  = Radiación solar difusa en el interior del invernadero

$\tau_d$  = Transmisividad a radiación difusa (equivale a la transmisividad global en días completamente nublados)

$D_o$  = Radiación solar difusa en el exterior

Conocer el coeficiente de enriquecimiento en radiación difusa ( $D_i/D_o$ ) es de suma importancia en estudios de modelos de cultivo (Spitters, 1986), especialmente en los destinados a evaluar los beneficios agronómicos o la eficiencia de un determinado material de cubierta de invernadero. Obviamente, el principal desafío en el futuro será maximizar los efectos beneficiosos de la radiación difusa en la homogeneidad de la intercepción de radiación por parte de la cubierta vegetal y en los componentes del rendimiento (Cabrera y col., 2009).

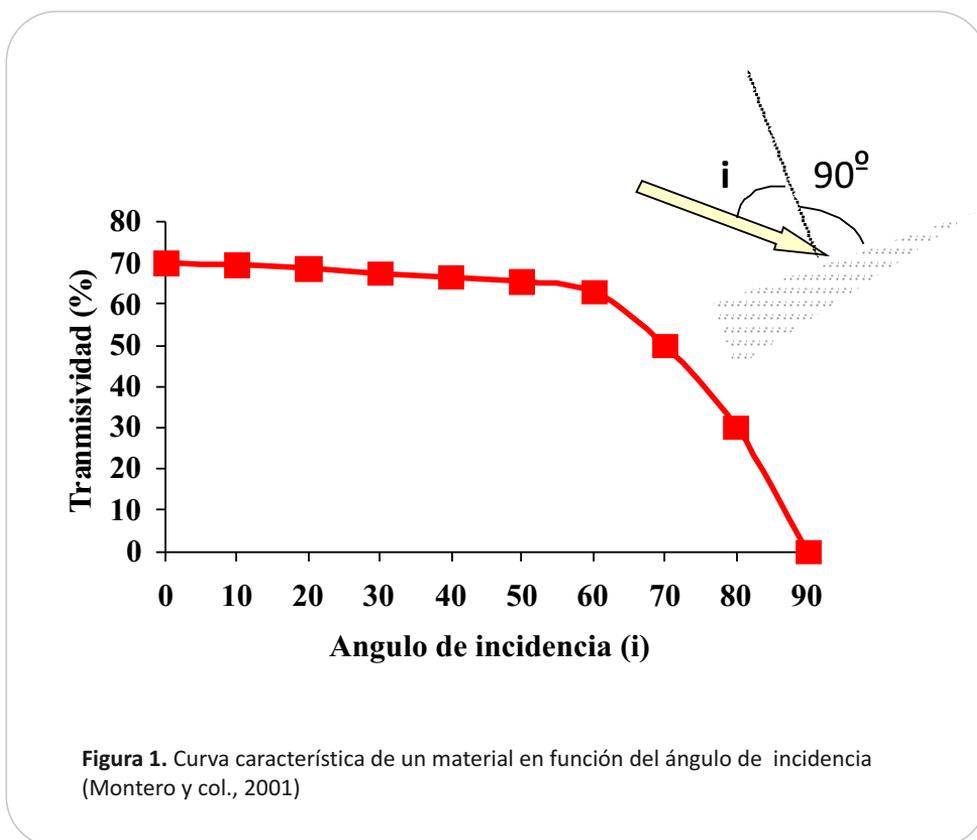
Por otro lado, además de la reducción del viento, la mayor modificación climática generada por una cubierta de malla en el recinto que delimita, depende del grado de sombreado (complemento de la transmisividad), ya que la limitación en la transmisividad va a imponer severos cambios en el balance de energía (Baille y col., 2001). El grado de sombreado es un parámetro comercial muy común que define a las mallas, pues describe las propiedades de la malla para absorber y reflejar el rango visible de la radiación solar (380-760 nm) (Castellano y col., 2008b). Generalmente se mide en condiciones de laboratorio con materiales nuevos y con un haz de luz que incide totalmente perpendicular al material (ángulo de incidencia cero). Estas condiciones no son las que se tienen en campo (Cohen y Fuchs, 1999), por lo que se hace necesaria la caracterización en condiciones reales. En todo caso el índice de sombreado dado por los fabricantes sólo se acercaría a la realidad en las horas centrales del día y en los días más próximos al solsticio de verano.

En condiciones de laboratorio, por tanto, se puede conocer la transmisividad máxima del material pero no la transmisividad media, más real, puesto que los ángulos de incidencia de los rayos solares varían desde la salida a la puesta de sol. Para latitudes superiores a los 23,5° N o inferiores a los 23,5° S nunca se consigue un haz de luz totalmente perpendicular, con lo que los valores medidos en laboratorio para haces perpendiculares distan mucho de los reales en campo.

En trabajos de investigación, se han usado sofisticados sistemas de medida en laboratorio para estudiar la transmisividad para distintos ángulos de incidencia, pero trabajando con luminarias artificiales cuyo rango espectral es distinto al de la luz solar. Además, las medidas realizadas en

laboratorio no tienen en cuenta la radiación difusa que es un componente importante de la radiación global solar (sobre todo, en los días nublados en que puede ser la fracción mayoritaria).

Resulta fundamental conocer las características de los diversos tipos de láminas (plásticos para cubierta de invernaderos, coloreados o no y con diversos aditivos para mejorar condiciones térmicas, difusoras, etc.; mallas de sombreado de diversos colores y porosidad; pantallas de protección térmica de diferentes materiales y características, etc.). Normalmente, a estos materiales se les asigna una curva de transmisividad a la radiación solar en función del ángulo de incidencia llamada curva característica (figura 1) pero obtenida, como se ha mencionado anteriormente, en laboratorio con fuentes de luz artificial y a pequeña escala, no existiendo las condiciones reales a que dichas láminas serán expuestas durante su empleo en distintas estructuras de protección de cultivos.



No existe una normativa europea definiendo las propiedades espectralradiométricas que deberían tener las mallas para uso agrícola (Sica y Picuno, 2008), que certifique la calidad de las mallas y garantice su homogeneidad (Soler y col., 2007). Realmente sólo hay una normativa nacional

en Italia (UNI10335/94) para establecer una metodología de evaluación de las mallas de sombreo, pero las medidas realizadas ponen en evidencia diferencias entre los valores obtenidos por este método y la transmisividad real en campo (Castellano y col., 2008a). Por esto, es necesaria una caracterización de materiales realizada en condiciones reales. Mientras que las propiedades radiométricas de otros materiales de cubierta coloreados, como los films plásticos (Pearson y col., 1995; Kittas y Baille, 1998), son investigados con regularidad, las propiedades radiométricas de mallas coloreadas usadas para estructura de malla agrícola han sido poco investigadas hasta ahora (Oren-Shamir y col., 2001; Shahak y Gussakovsky, 2004; Shahak y col., 2004.). Estudios de los valores de transmisividad muestran que el color de una malla influye en la distribución espectral de la radiación que pasa a través de ella absorbiendo sus colores complementarios (Castellano y col., 2008a). En general, las mallas transparentes son más transmisivas que las transparentes-negras y estas, a su vez que las verdes para la misma densidad de hilos (Soriano y col., 2006). Algunos autores (Castellano y col., 2008a) consideran que las mallas, en general, tienen menor transmisividad a la radiación difusa que a la directa, siendo también las mallas negras las más opacas a la transmisión de radiación difusa, con diferencias respecto a la directa del 7%. Las mallas con hilos transparentes son más adecuadas para maximizar la transmisión de la radiación difusa.

En definitiva, los materiales de cubierta provocan una reducción cuantitativa (grado de sombreo) y una modificación cualitativa de la radiación, induciendo una modificación espectral de la misma (Kittas y Baille, 1998; Kittas y col., 1999). Estas variaciones en el espectro pueden producir importantes cambios productivos y morfogénicos en los cultivos (Smith, 1982; Ehret y col., 1989; Shumin y col., 2000), así como en el ciclo biológico de hongos patógenos e incluso en el comportamiento de los insectos vectores de virosis. Por tanto, la importancia de la radiación solar como factor determinante de crecimiento y producción de los cultivos exige su caracterización.

## 2. Objetivos

1. Determinar las curvas características de transmisividad a radiación solar global en condiciones reales en campo de nueve mallas de diferente densidad, color, calibre, peso y porosidad, empleando un bastidor diseñado para tal efecto.

2. Determinar las curvas características de transmisividad a radiación solar PAR en condiciones reales en campo de nueve mallas de diferente densidad, color, calibre, peso y porosidad, empleando un bastidor diseñado para tal efecto.

3. Determinar el cociente entre la radiación difusa bajo malla ( $DIF_m$ ) y la radiación difusa exterior ( $DIF_e$ ) en condiciones reales en campo conseguido utilizando nueve mallas de diferente densidad, color, calibre, peso y porosidad, empleando un bastidor diseñado para tal efecto.

4. Determinar las transmisividades o, en su caso, los coeficientes de enriquecimiento en radiación difusa de las nueve mallas para distintos ángulos de incidencia de la radiación.

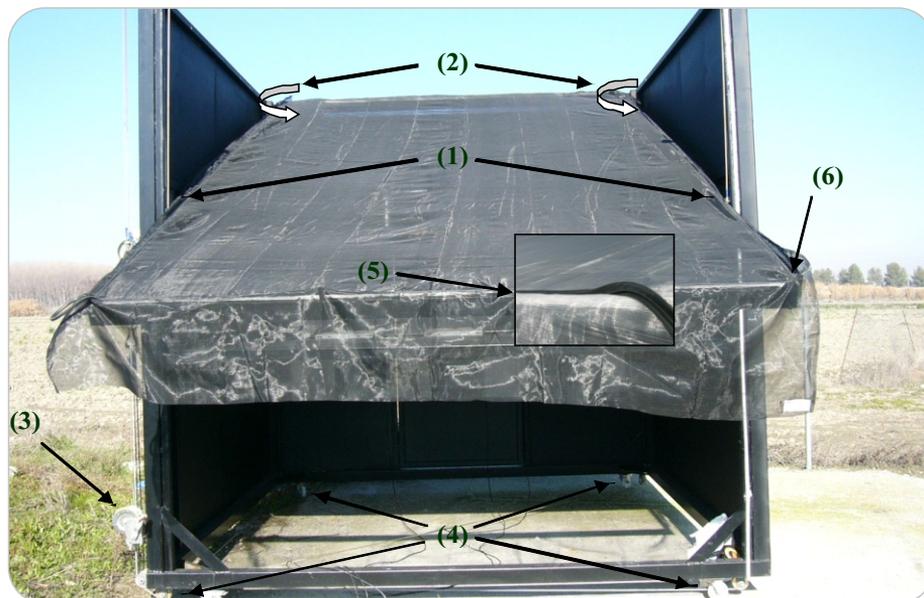
5. Comparar el comportamiento de los diferentes tipos de mallas frente a los distintos tipos de radiación (global, difusa y PAR).

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Bastidor

Para la medida de transmisividad a radiación solar global, a radiación fosintéticamente activa (PAR) y a radiación directa y difusa, se diseñó y construyó un bastidor® (Soriano y col., 2008) que permitió determinar la curva característica de transmisividad a radiación solar de mallas de sombreado de todo tipo, objetivo de nuestro estudio, así como de otros materiales de cubierta de protección de cultivos, en función de los diversos ángulos de incidencia de los rayos solares sobre la superficie del material. Las medidas se realizaron en condiciones de campo con luz solar y a muy bajo coste en comparación con los sofisticados métodos utilizados en laboratorio, donde además la fuente de luz utilizada es artificial y, por tanto, difiere en mayor o menor medida de la radiación real a la que los materiales se exponen en campo.

El bastidor es una estructura metálica construida con perfiles de sección cuadrada de 4 cm de lado. La base es un cuadrado de 3 m de lado. En los cuatro vértices de la base se insertaron cuatro postes de los mismos perfiles (cuadrados de 4 cm de lado) y 3 m de altura (foto 1).



**Foto 1.** Bastidor para la medida de transmisividad a radiación solar de mallas plásticas

De la parte superior de los postes posteriores, salen los brazos de fijación del material a probar (1), que pueden girar alrededor del punto de inserción al poste (2). Estos brazos se fijaron a distinta altura en los postes delanteros de la estructura consiguiendo así que el material que se colocó sobre ellos quedara con distinta inclinación respecto a la horizontal, en función de la altura de fijación. Para conocer la angulación conseguida, los postes de fijación (delanteros) estaban graduados con una escala en cm; las equivalencias angulares de esta escala se explican más adelante, y son función de la posición del sol en cada momento del día y época del año. La subida y bajada de los brazos móviles se realizó por un sistema de poleas con un seguro que permite la fijación a la altura deseada (3). Además, el bastidor estaba dotado de ruedas para ubicarlo frente al sol en cada momento en función del ángulo acimutal de la radiación (4).

El bastidor estaba cerrado por los laterales y por la parte posterior para evitar la incidencia de luz, lo que distorsionaría la medida; ésta pretende evaluar únicamente la luz que penetra a través del material colocado sobre el bastidor. Todos los elementos de la estructura estaban pintados en color negro mate para evitar la reflexión de la luz sobre ellos y evitar su deterioro.

disponían de un perfil omega de aluminio de 4 cm de ancho sobre el que se fija el material flexible a caracterizar encajando una cinta de goma (5). El perfil inferior constaba además de placas a modo de topes que permiten la utilización del aparato con materiales rígidos (6).

El bastidor disponía de una plataforma horizontal donde se ubicaban los sensores de radiación. Se trata de una plataforma de 3 m de largo por 2 m de ancho que podía desplazarse a lo largo de la estructura por un sistema de poleas y tomar distintas alturas, con lo que podíamos modificar la distancia del sensor al material que estábamos caracterizando, para poder medir la influencia de la distancia a la cubierta sobre los diferentes tipos de radiación transmitida.

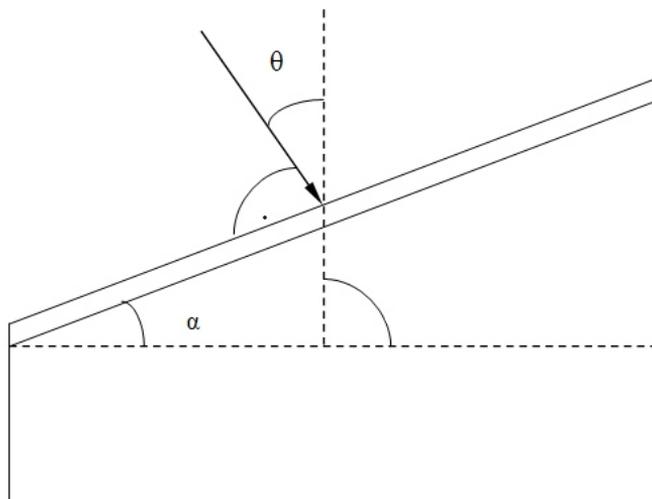
### 3.2. Procedimiento de medida

Para la caracterización de la transmisividad a radiación solar de las mallas en función del ángulo de incidencia de la radiación, se siguieron tres pasos:

1.- Se colocó la malla a testar sobre el bastidor y se fijó mediante los perfiles omega con la cinta de goma.

2.- Se orientó el bastidor de modo que la parte frontal quedará perpendicular al ángulo acimutal del sol en cada momento. Esta colocación se realizó simplemente haciendo coincidir las sombras de los postes anterior y posterior de cada lado.

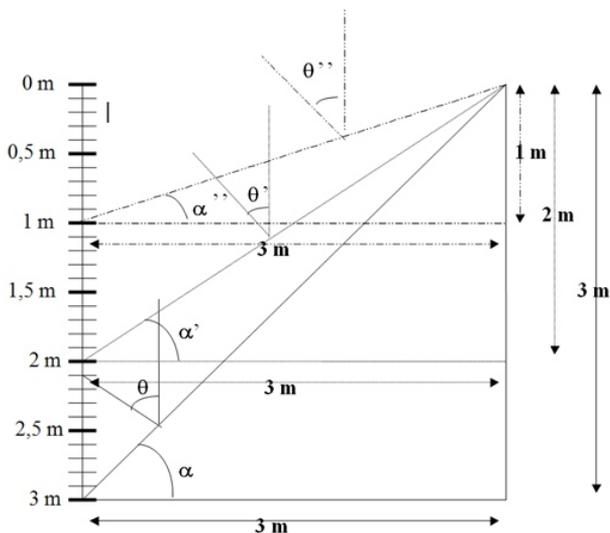
3.- Se posicionaron los brazos del bastidor en el punto correspondiente al ángulo de incidencia que se quiso medir. Los postes delanteros presentaban una escala que indica la distancia en metros desde la parte superior del poste. A partir de esta distancia podíamos conocer cual es el ángulo formado por el material colocado en el bastidor con la horizontal ( $\alpha$ ) (que sería igual al ángulo cenital ( $\theta$ ) para el que el bastidor estaría orientado con un ángulo de incidencia de la radiación de  $0^\circ$ ). Simplemente desplazando los brazos a lo largo de los postes a distintas posiciones, podíamos caracterizar la transmisividad de la malla para los distintos ángulos de incidencia.



**Figura 2.** Ángulo cenital correspondiente a una posición de medida sobre el bastidor plásticos

Como ejemplo, los valores de los ángulos cenitales correspondientes a tres posiciones (1 m, 2 m y 3 m desde el tope superior), se calcularían por (figura 3):

$$\begin{array}{ll} \text{tg } \alpha = 3/3 & \Rightarrow \theta = \text{arctg } 1 = 45^\circ \\ \text{tg } \alpha' = 2/3 & \Rightarrow \theta' = \text{arctg } (2/3) = 33,6^\circ \\ \text{tg } \alpha'' = 1/3 & \Rightarrow \theta'' = \text{arctg } (1/3) = 18,4^\circ \end{array}$$



**Figura 3.** Ángulos cenitales correspondientes a tres posiciones de medidas sobre el bastidor

$\theta$ ,  $\theta'$  y  $\theta''$  son los ángulos cenitales que corresponden al momento en que la radiación solar incidiría perpendicularmente sobre la malla (figura 3); por ejemplo, cuando el valor del ángulo cenital en un lugar determinado sea de  $18^\circ$ , sabremos que el brazo del bastidor habrá de fijarse a 1 m para obtener una medida de la transmisividad del material con un ángulo de incidencia de  $0^\circ$ .

A continuación se incluye una tabla donde se presentan, para distancias desde la parte superior del poste, a intervalos de 10 cm, los valores del ángulo cenital para el que la malla quedaría perpendicular al ubicarla en esa posición.

**Tabla 1.** Valores del ángulo cenital ( $\theta$ ) para el que la malla quedaría perpendicular a la radiación al fijar los brazos del bastidor a esa distancia desde el tope superior del poste

DISTANCIA DESDE LA PARTE SUPERIOR (m)	ÁNGULO CENITAL ( $^\circ$ )
0,10	1,91
0,20	3,81
0,30	5,71
0,40	7,59
0,50	9,46
0,60	11,31
0,70	13,13
0,80	14,93
0,90	16,70
1,00	18,43
1,10	20,14
1,20	21,80
1,30	23,43
1,40	25,02
1,50	26,56
1,60	28,07
1,70	29,54
1,80	30,96
1,90	32,35
2,00	33,69
2,10	34,99
2,20	36,25
2,30	37,48
2,40	38,66
2,50	39,81
2,60	40,91
2,70	41,99
2,80	43,02
2,90	44,03
3,00	45,00

A partir de esta tabla, por interpolación, podremos determinar también las alturas de fijación para conseguir distintos ángulos de incidencia de la radiación sobre el material. Si, por ejemplo, queremos caracterizar un determinado material, un día 16 de septiembre a las 12 horas solares, en una ubicación de 37º de latitud y 3º de longitud, sabemos, por programas existentes de cálculo de las coordenadas astronómicas (EZ Cosmos Sky Plot, Versión 3.000.006), que el ángulo cenital correspondiente es de 35º. Para medir la transmisividad del material con un ángulo de incidencia de 0º, el brazo del bastidor deberá fijarse en el punto 2,10 m de la escala graduada (ver tabla 1). Si quisiéramos medir la transmisividad para un ángulo de incidencia de 5º, deberíamos fijarla a 1,70 m; para 10º, se fijaría en 1,40 m y para 15º en 1,10 m.

### 3.3. Localización e instrumental radiométrico

El estudio se desarrolló en el Centro IFAPA Camino de Purchil, ubicado en la Vega de Granada (Latitud: 37º 10' 21"N; Longitud: 3º 38' 10"O; Altitud: 600 m). Las medidas de la cantidad y la calidad de la radiación tanto exterior como interior se realizaron en días soleados puntuales durante los meses de febrero, marzo y abril de 2009, entre las 8:00 y 12:00 horas solares. El bastidor se instaló sobre una plataforma de cemento lisa y nivelada, que permitirá la orientación y nivelación del mismo.

Para la caracterización de la transmisividad a radiación solar de las mallas estudiadas se emplearon sensores de radiación global (CM6B, Kipp&Zonen), radiación fotosintéticamente activa (PAR) (SKP215/S, Sky Instruments) y para medir radiación difusa se utilizó el anillo de sombra (CM121B, Kipp&Zonen). Se instalaron tres sensores de radiación (global, PAR y difusa) en el interior del bastidor, bajo la malla. Sobre una plataforma nivelada ubicada en el exterior, junto al bastidor, se instalaron otros tres sensores idénticos de radiación (global, PAR y difusa). Se realizó una calibración previa de todos los sensores empleados a lo largo de un día soleado. La utilización del anillo de sombreado Kipp&Zonen CM121B conlleva la necesidad de aplicar un factor de corrección para compensar la reducción de radiación difusa en la banda de sombreado del anillo. Este coeficiente (S) viene dado por la fórmula:

$$S = 2V \cdot \cos D \cdot (U_0 \cdot \sin B \cdot \sin D + \sin U_0 \cdot \cos B \cdot \cos D) / \pi$$

Ecuación 2

dónde:

V = Constante debida al perfil del anillo

D = Declinación solar

$U_0$  = Ángulo formado por la posición del sol en el momento de su salida (o puesta) y el sol en el mediodía en el plano del anillo. Viene dado por:

$$\cos U_0 = -\tan B \cdot \tan D$$

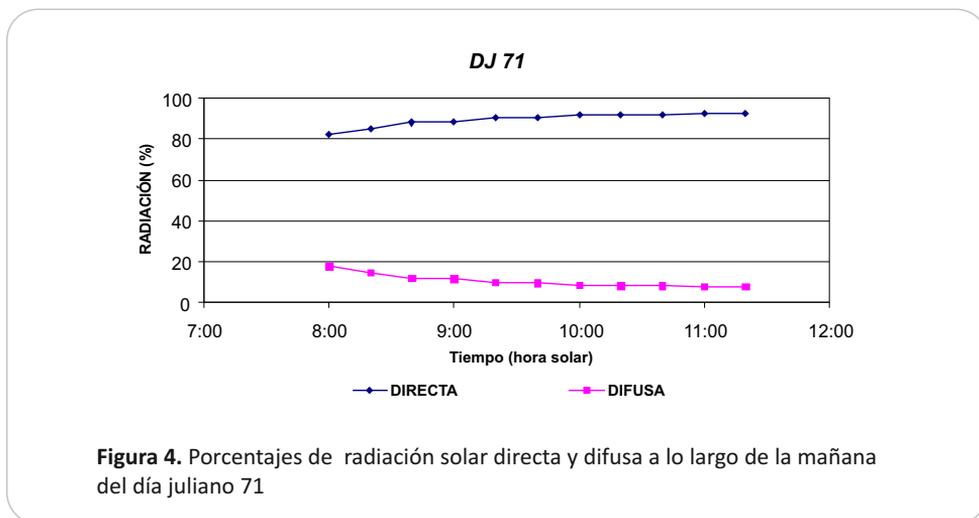
Ecuación 3

siendo B la latitud.

Para el anillo utilizado, el fabricante determina un valor de la constante de V de 0,185 rad.

Todos los sensores se conectaron a un datalogger CR10X de Campbell, programado para registrar medidas simultáneas cada cinco minutos y registrar el promedio de 10 minutos. Con los valores de radiación medidos con los sensores situados en el exterior e interior del bastidor, se calculó la transmisividad de las mallas por cociente de ambos (interior/exterior).

La medición en días soleados supone porcentajes de radiación difusa exterior bajos. Por ejemplo, para el día de medida (DJ 71), la figura 4 representa los porcentajes de radiación solar difusa y directa respecto a la global. Se obtuvo un valor medio diario de radiación solar difusa respecto a la radiación global de 10,7% frente al 89,3% que representó la radiación solar directa. Estos valores son similares a los registrados por el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada (12,6% de radiación difusa y 87,4% de radiación solar directa) (Tovar y col., 2001).



No obstante, al realizarse las medidas a finales de invierno y principios de primavera cuando la elevación del sol es pequeña, este porcentaje de radiación solar difusa es superior al que se registraría a finales de primavera y en verano, cuando la luz natural tiene un carácter más directo.

### 3.4. Tipos de mallas y ángulos de incidencia

Se evaluaron nueve clases diferentes de mallas, empleadas principalmente en agricultura como sombreo y antiplagas. El tipo de mallas que se estudiaron son de un tejido de filamento de polietileno de alta densidad de diferentes grosores, colores y densidades. Los materiales valorados han sido malla negra de 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, malla transparente (blanca o cristal) de 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, todas ellas fabricadas por la empresa textil Condepols. Para obtener la caracterización geométrica de las mallas se contó el número de hilos, se midió el calibre del hilo (Digital Caliper 0-150 nm), se calculó el número de huecos y el tamaño del hueco y finalmente la porosidad de la malla (tabla 2).

**Tabla 2.** Principales características de las mallas plásticas estudiadas

NOMBRE COMERCIAL	FABRICANTE	MATERIAL	DENSIDAD(hilos cm <sup>-2</sup> )	COLOR	CALIBRE(mm)	PESO(g m <sup>-2</sup> )	TAMAÑO HUECO(mm <sup>2</sup> )	POROSIDAD (%)
ANTIIRIP 20 X 10	CONDEPOLS	HDPE + Estabilizantes	20 x 10	Negro	0,23	150	0,18	31,00
				Transparente	0,25		0,15	25,00
ANTIIRIP 16 X 10	CONDEPOLS	HDPE + Estabilizantes	16 x 10	Negro	0,23	122	0,30	40,20
				Transparente	0,25		0,26	35,00
MOSQUITERA 9 X 6	CONDEPOLS	HDPE + Estabilizantes	9 X 6	Negro	0,28	95	1,45	58,00
				Transparente				
MOSQUITERA 6 X 6	CONDEPOLS	HDPE + Estabilizantes	6 X 6	Negro	0,28	75	2,57	66,40
				Transparente				
				Verde				

En cada una de las mallas estudiadas se cuantificó la transmisividad real a radiación solar global, PAR y difusa con ángulos de incidencia de 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60° y 65° en días totalmente soleados. También se cuantificó la transmisividad real a radiación difusa para todas las mallas en días completamente nublados, con el fin de obtener el factor de conversión ( $\tau_{b,d}$ ) de radiación directa en difusa (Baille y col., 2003) de cada material (ecuación 1). Previamente se comprobó, en días nublados, que la transmisividad a radiación difusa no variaba con el ángulo de incidencia, por lo que las medidas en días nublados sólo se hicieron para un único ángulo.

## 4. Resultados y discusión

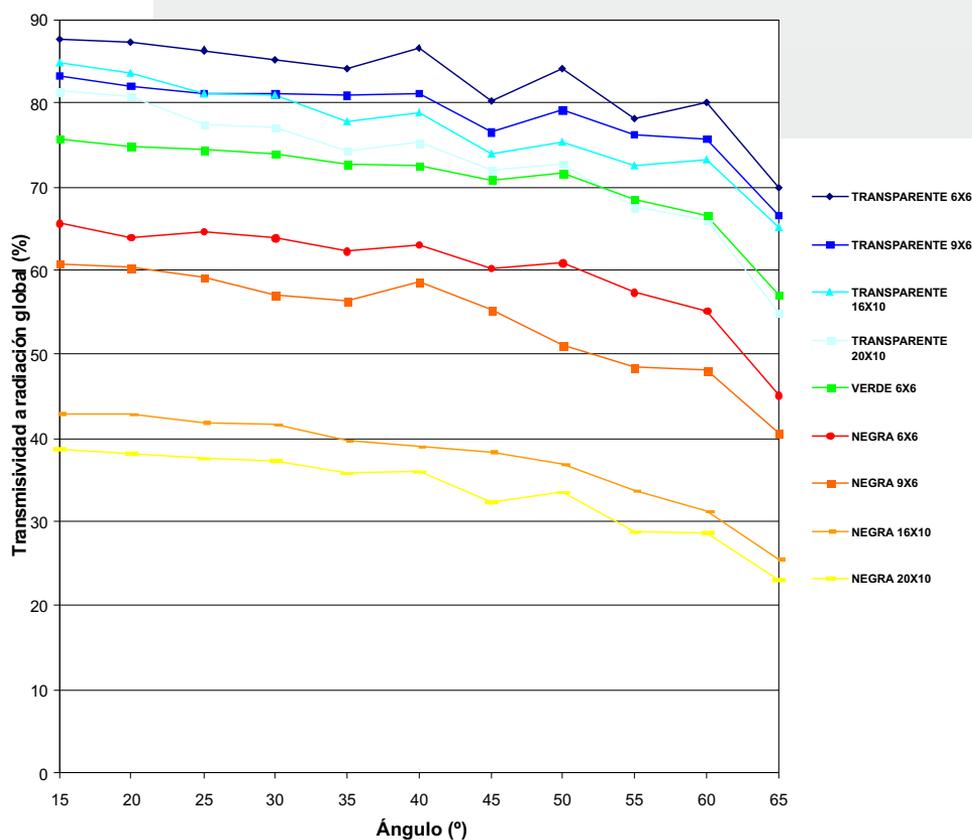
### 4.1. Curvas características de los materiales para la radiación solar global y PAR y cociente entre la radiación difusa bajo malla ( $D_i$ ) y la radiación difusa exterior ( $D_o$ )

La curva característica de los materiales testados para transmisividad a radiación solar global y PAR medida en el bastidor se puede ver en las figuras 5 y 6. El comportamiento relativo de las diferentes mallas estudiadas frente a radiación solar global y PAR fue muy similar. A medida que aumenta el ángulo de incidencia disminuyen los valores de transmisividad de forma similar para todos los materiales. Estos resultados son concordantes con los descritos por Montero y col. (2001) para radiación global.

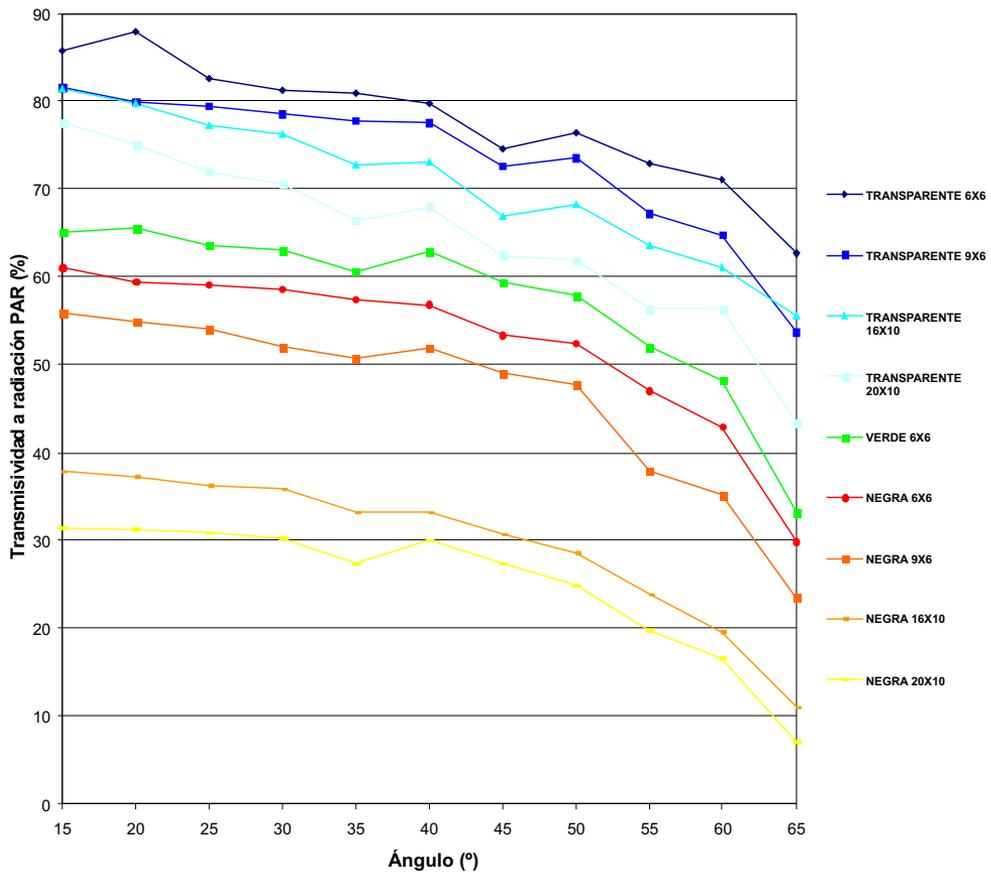
Las mallas transparentes poseen mayor transmisividad a radiación global y PAR, seguidas de la malla verde y de las mallas negras, para igual densidad de hilos. Resultados similares fueron obtenidos para radiación global por Soriano y col. (2006). Las mallas negras absorben todas las longitudes de onda reflejando menos radiación tanto hacia el exterior como bajo la malla. Las mallas transparentes además de reflejar todas las longitudes de onda por su color claro, son en parte translúcidas, de modo que dejan pasar parte de la radiación a través de los hilos, por lo que su transmisividad es máxima. Las mallas verdes tienen un comportamiento intermedio.

Por otro lado, a igualdad de color, son las mallas con menor densidad de hilo y mayor porosidad (6x6) las mallas más transmisivas. En la figura 5 se puede apreciar como incluso la transmisividad de la malla transparente de menor porosidad (20x10) se mantiene por encima de la malla verde 6x6 para ángulos de incidencia bajos, hasta un valor de 50° donde desciende mucho su

transmisividad. Este descenso fue previsible al producirse un mayor choque de la radiación más oblicua con los hilos que forman la malla más densa para ángulos de incidencia elevados. En este sentido, para la elección de una malla determinada, será interesante tener en cuenta también criterios de ventilación e impacto visual y ambiental, ya que, mallas menos densas consiguen un grado de sombreado similar a otras más densas en función del color de la misma. En este caso concreto, la malla verde 6x6 presumiblemente tendrá una ventilación mayor. Además, por su color, puede mejorar el impacto estético en el paisaje rural (Castellano y col., 2008b) y por la cantidad de material empleado en su fabricación, su impacto ambiental será menor.



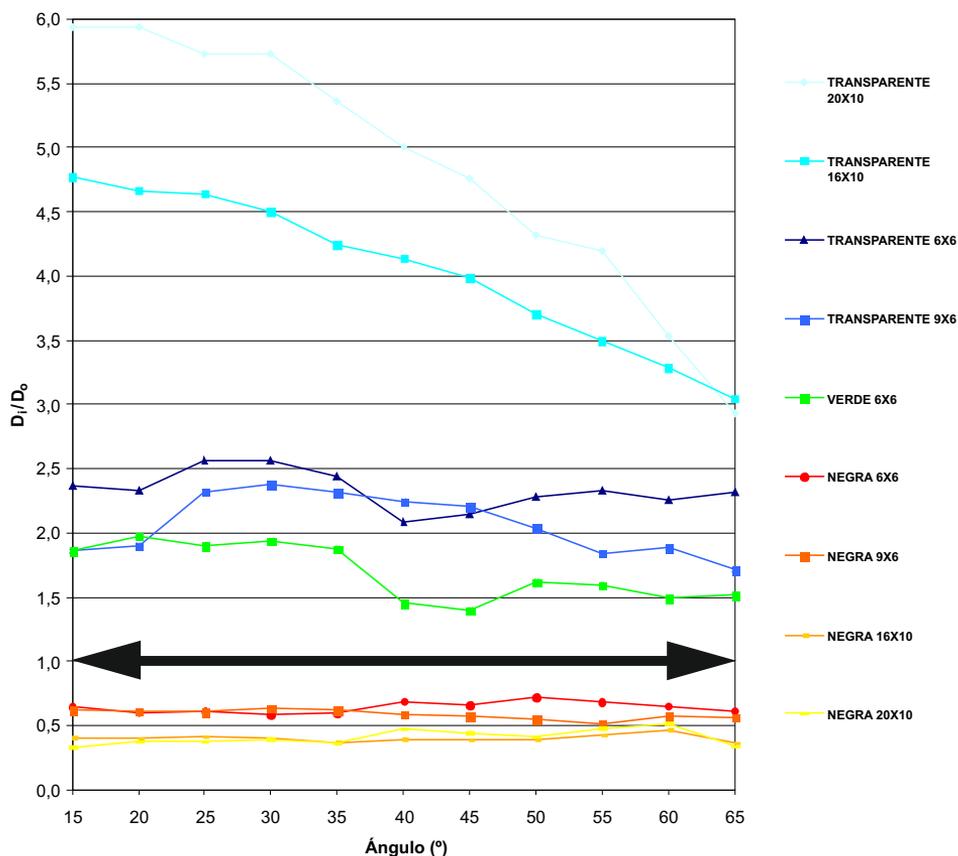
**Figura 5.** Curvas características de transmisividad a radiación solar global (%) en función de los ángulos de incidencia (15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60° y 65°) para las mallas negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, para las mallas transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>



**Figura 6.** Curvas características de transmisividad a radiación solar PAR (%) en función de los ángulos de incidencia (15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60° y 65°) para las mallas negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, para las mallas transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>

Tanto en radiación global como en radiación PAR, la variación de transmisividad con el grosor y la densidad de los hilos fue mayor en el caso de las mallas negras que en las transparentes, puesto que en estas últimas los hilos tienen una cierta contribución al paso de radiación solar a través de ellos. La malla verde está más próxima al comportamiento transmissivo de las mallas transparentes para la radiación global mientras que en el caso de la radiación PAR (400 a 700 nm) (McCree,1972), sus valores de transmisividad son relativamente menores pues hay una importante reflexión de la longitud de onda del verde (500 nm a 600 nm) hacia el exterior.

El cociente entre la radiación difusa bajo malla y la radiación difusa exterior ( $D_i/D_o$ ) de las diferentes mallas evaluadas para los distintos ángulos de incidencia se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Cociente entre la radiación difusa bajo malla ( $D_i$ ) y la radiación difusa exterior ( $D_o$ ) en función de los ángulos de incidencia ( $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $65^\circ$ ) para las mallas negras  $20 \times 10$ ,  $16 \times 10$ ,  $9 \times 6$  y  $6 \times 6$  hilos·cm<sup>-2</sup>, para las mallas transparentes  $20 \times 10$ ,  $16 \times 10$ ,  $9 \times 6$ ,  $6 \times 6$  hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde  $6 \times 6$  hilos·cm<sup>-2</sup>

Como podemos observar en la figura, se produce un gran enriquecimiento en radiación difusa ( $D_i/D_o$ ) para las mallas transparentes más densas (próximo a 6 para la malla  $20 \times 10$  y ángulos de incidencia bajos) y un enriquecimiento más moderado para las mallas transparentes menos densas y para la malla verde (próximo a 2). Esto fue debido a las propiedades de reflexión y difusión que caracterizan a las mallas con hilo transparente o verde. Las mallas con hilos transparentes fueron

más adecuadas para maximizar la transmisión de la radiación difusa coincidiendo con Castellano y col., 2008a. Los hilos de las mallas transparentes, de color claro, son traslúcidos y por tanto dejan pasar parte de la radiación solar a través de ellos comportándose de forma similar a una lámina plástica difusora. Además, como consecuencia de su color claro, reflejan todas las longitudes de onda. El comportamiento de los hilos de la malla verde fue similar aunque con un efecto menor respecto a las mallas transparentes.

La diferencia entre las mallas transparentes 20x10 y 16x10 disminuye de forma acusada al aumentar el ángulo de incidencia, siendo casi insignificante para los ángulos más altos, ya que al crecer el ángulo, los rayos solares más oblicuos, chocan en mayor proporción con los hilos de la malla. De esta forma, su paso a través de los orificios se reduce, teniendo más peso en la radiación total transmitida la cantidad de radiación difusa generada por el paso a través de los hilos, comportándose como si se tratara de una lámina plástica continua independientemente de la porosidad de la malla.

En el caso de las mallas negras, sin embargo, se producen reducciones importantes en la radiación difusa bajo la malla (valores máximos del cociente  $D_i/D_o$  de 0,72). En este caso, los hilos son opacos y la radiación solar incidente no es modificada por la malla (Castellano y col., 2008b), ya que los hilos no dejan pasar la radiación solar a través de ellos, absorbiendo todas las longitudes de onda y, por tanto, su poder de reflexión es mínimo.

Para el color negro, las menores reducciones en la transmisividad a la radiación se dieron para las mallas negras 9x6 y 6x6, para todos los ángulos de incidencia con valores muy similares en ángulos de incidencia bajos. No obstante, en los ángulos mayores (40° a 65°) se produjo un descenso más acusado para la malla 9x6 que, sin embargo, no se da en la malla 6x6. En esta última, la superficie de orificios fue superior y, por tanto, pasa una mayor cantidad de radiación a través de ellos. Para ángulos de incidencia elevados, al disminuir la perpendicularidad del rayo solar incidente respecto a la malla, los rayos solares chocan en una mayor superficie con los hilos opacos y la cantidad de radiación solar que pasa a través de los orificios fue menor. Este efecto fue mayor a medida que aumenta la densidad de los hilos. En este caso puede influir la orientación que se da a la trama de la malla 9x6. Es previsible que haya diferencias entre una colocación de la dirección más densa en sentido este-oeste, y una colocación de la dirección más densa en sentido norte-sur.

En general, estos resultados coinciden con los de diversos autores que determinaron que la difusión de la cubierta varía ampliamente debido a las diferencias en la estructura del material de cubierta (Basiaux y col., 1973; Raviv y Allingham, 1983; Pearson y col., 1995).

La transmisión de la radiación solar difusa en días completamente nublados, fue superior en las mallas transparentes de mayor densidad, con valores del 70% y en las mallas negras menos densas (6x6) con valores del 54%. Estas últimas tienen valores similares a la verde 6x6 (tabla 3).

**Tabla 3.** Transmisión de radiación difusa ( $\tau_d$ ) equivalente a la transmisión de la radiación global en días completamente nublados, para diferentes tipos de mallas: negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>

	$\tau_d$ (%)
<b>BLACK 20X10</b>	25
<b>BLACK 16X10</b>	26
<b>BLACK 9X6</b>	27
<b>BLACK 6X6</b>	54
<b>GREEN 6X6</b>	58
<b>NON-COLOURED 20X10</b>	70
<b>NON-COLOURED 16X10</b>	70
<b>NON-COLOURED 9X6</b>	71
<b>NON-COLOURED 6X6</b>	64

#### 4.2. Transmisividad a radiación solar global y PAR y cocientes entre radiación difusa bajo la malla y radiación difusa en el exterior ( $D_i/D_o$ )

En la tabla 4, se pueden ver los valores de la transmisividad a radiación solar global y PAR y los cocientes entre radiación difusa registrada bajo la malla y en el exterior.

**Tabla 4.** Valores del Cociente de radiación difusa ( $D_f/D_0$ ) y Transmisividad a radiación solar global (%) y PAR (%) en función de los ángulos de incidencia (15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60° y 65°) para las mallas negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, para las mallas transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>

ÁNGULO	NEGRA 20X10			NEGRA 16X10			NEGRA 9x6		
	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)
15	0,33	38,68	31,38	0,40	42,96	37,86	0,62	60,79	55,88
20	0,37	38,17	31,25	0,40	42,88	37,28	0,61	60,37	54,91
25	0,37	37,57	30,85	0,41	41,89	36,23	0,61	59,30	54,00
30	0,39	37,31	30,20	0,40	41,57	35,80	0,63	57,03	52,01
35	0,36	35,79	27,35	0,37	39,72	33,16	0,62	56,31	50,69
40	0,47	35,98	29,93	0,39	38,94	33,19	0,58	58,63	51,86
45	0,44	32,38	27,31	0,38	38,35	30,64	0,57	55,37	49,00
50	0,41	33,48	24,80	0,38	36,89	28,65	0,54	51,08	47,65
55	0,48	28,81	19,68	0,42	33,65	23,79	0,51	48,54	37,95
60	0,51	28,77	16,61	0,46	31,28	19,57	0,57	48,12	35,24
65	0,34	23,10	7,07	0,36	25,60	10,99	0,56	40,59	23,43

ÁNGULO	NEGRA 6X6			TRANSPARENTE 20X10			TRANSPARENTE 16X10		
	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)
15	0,65	65,67	61,03	5,95	81,47	77,57	4,77	84,82	81,43
20	0,60	63,91	59,45	5,94	80,81	75,02	4,66	83,57	79,77
25	0,60	64,65	59,06	5,73	77,49	71,93	4,64	81,18	77,29
30	0,58	63,88	58,60	5,73	77,17	70,62	4,50	80,96	76,29
35	0,59	62,34	57,37	5,36	74,37	66,46	4,24	77,88	72,73
40	0,68	63,17	56,83	5,00	75,36	67,96	4,14	78,90	73,15
45	0,65	60,23	53,32	4,77	71,98	62,50	3,98	74,04	66,98
50	0,72	60,93	52,43	4,32	72,74	61,95	3,70	75,38	68,22
55	0,68	57,39	47,00	4,20	67,52	56,39	3,49	72,55	63,60
60	0,65	55,26	42,95	3,53	66,08	56,39	3,28	73,17	61,11
65	0,61	45,10	29,81	2,93	55,07	43,37	3,04	65,19	55,53

ÁNGULO	TRANSPARENTE 9x6			TRANSPARENTE 6X6			VERDE 6X6		
	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)	$D_f/D_0$	Global(%)	PAR(%)
15	1,86	83,30	81,52	2,37	87,60	85,72	1,86	75,75	65,15
20	1,90	82,06	79,90	2,33	87,30	87,97	1,98	74,88	65,52
25	2,32	81,24	79,38	2,56	86,31	82,57	1,90	74,48	63,54
30	2,38	81,07	78,60	2,56	85,25	81,32	1,94	73,98	63,02
35	2,31	80,91	77,80	2,44	84,06	80,91	1,88	72,65	60,62
40	2,25	81,20	77,52	2,08	86,56	79,74	1,45	72,61	62,81
45	2,20	76,56	72,61	2,15	80,22	74,52	1,39	70,84	59,40
50	2,04	79,15	73,55	2,27	84,06	76,43	1,62	71,62	57,84
55	1,84	76,22	67,20	2,33	78,17	72,87	1,60	68,50	52,00
60	1,88	75,73	64,76	2,25	79,99	71,01	1,49	66,66	48,25
65	1,71	66,60	53,67	2,31	69,94	62,65	1,52	57,09	33,17

Como se ha visto anteriormente en las curvas características, en la transmisividad a radiación solar global y PAR, los mayores valores se consiguen con las mallas transparentes, alcanzando valores máximos superiores al 87% de transmisividad a radiación global y próximos al 86% para la radiación PAR, para el ángulo de incidencia menor ( $15^\circ$ ) y para densidad de hilos 6x6. Los valores máximos para las mallas negras, sin embargo, están próximos al 66% y al 61% de transmisividad a radiación global y PAR, respectivamente, siendo también la malla más transmisiva, la malla con menor densidad de hilos (6x6).

La malla verde muestra valores de transmisividad global y PAR máximos (75,75% y 65,15%) próximos a los valores obtenidos con la malla transparente de mayor densidad de hilos (20x10). Si comparamos la transmisividad global y PAR de las mallas transparente, verde y negra de igual densidad de hilos (6x6) y, por tanto, igual porosidad (66,40%), observamos que la transmisividad de la malla transparente (87,60% y 85,72% para global y PAR respectivamente) fue mayor que la transmisividad de la malla verde (75,75% y 65,15%) y ésta a su vez mayor que la transmisividad de la malla negra (65,67% y 61,03%).

En la tabla 5 podemos ver la variación máxima entre las reducciones producidas en la radiación global y PAR y en el cociente de radiación difusa ( $D_i/D_o$ ) con el ángulo de incidencia. Existe una tendencia opuesta en el porcentaje de variación máxima producida en la transmisividad a radiación global y PAR con la densidad de hilos de las mallas negras y transparentes, alcanzando los valores más altos las mallas negras de mayor porosidad y las mallas transparentes de porosidad inferior.

**Tabla 5.** Variación máxima (%) producida en las transmisividades a radiación global (%) y PAR (%) y en el cociente de radiación difusa ( $D_i/D_o$ ) al variar el ángulo de incidencia de la radiación sobre los diferentes tipos de mallas: mallas negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, mallas transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>

	GLOBAL (%)	PAR (%)	( $D_i/D_o$ )
NEGRA 20X10	15,6	24,2	0,18
NEGRA 16X10	17,4	26,9	0,10
NEGRA 9X6	20,2	32,4	0,13
NEGRA 6X6	20,6	31,2	0,14
VERDE 6X6	18,7	32,3	0,58
TRANSPARENTE 20X10	26,4	34,2	3,01
TRANSPARENTE 16X10	19,6	25,9	1,73
TRANSPARENTE 9X6	16,7	27,9	0,67
TRANSPARENTE 6X6	17,7	25,3	0,49

En las mallas negras de mayor porosidad, la cantidad de radiación que pasa a través de la malla aumenta con ésta, ya que el número de huecos que quedan entre los hilos es mayor. Sin embargo, a medida que aumenta el ángulo de incidencia, el choque de la radiación con los hilos opacos fue mayor, produciéndose una reducción en la transmisividad proporcionalmente mayor a la que se produce en las mallas más densas.

En cuanto a las mallas transparentes de menor porosidad, el número de huecos que quedan entre los hilos fue menor, pasando una mayor cantidad de radiación a través de los hilos que de los huecos. Como se ha dicho anteriormente, al aumentar el ángulo de incidencia, este material, con gran cantidad de hilos por centímetro, se comporta como una lámina plástica traslúcida en la cual, el ángulo de incidencia de la radiación tiene una gran influencia en la transmisión de la misma.

A lo largo de un día, la variación de la relación  $D/D_0$  será mayor para las mallas transparentes más densas. En las mallas negras la influencia del ángulo de incidencia fue mucho menor (valores variando de 0,10 a 0,18 frente a variaciones de 0,49 a 3,01 en mallas transparentes).

El factor de conversión ( $\tau_{b-d}$ ) de radiación directa en difusa calculado para cada una de las mallas estudiadas, se puede ver en la tabla 6. Este factor nos demuestra que la mayor conversión de radiación directa en difusa se produce para las mallas transparentes, alcanzando un 0,81 la malla transparente 20x10. La cantidad de radiación solar directa convertida en difusa para las mallas negras es bastante inferior, con valores entre 0,01 y 0,05.

**Tabla 6.** Factor de conversión ( $\tau_{b-d}$ ) de radiación directa en difusa para las mallas negras 20x10, 16x10, 9x6 y 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>, mallas transparentes 20x10, 16x10, 9x6, 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup> y malla verde 6x6 hilos·cm<sup>-2</sup>

	$\tau_{b-d}$
<b>NEGRA 20X10</b>	0,02
<b>NEGRA 16X10</b>	0,02
<b>NEGRA 9X6</b>	0,05
<b>NEGRA 6X6</b>	0,01
<b>VERDE 6X6</b>	0,13
<b>TRANSPARENTE 20X10</b>	0,81
<b>TRANSPARENTE 16X10</b>	0,59
<b>TRANSPARENTE 9X6</b>	0,39
<b>TRANSPARENTE 6X6</b>	0,47

En resumen, observamos tres efectos importantes:

1) Las mallas transparentes consiguen enriquecimientos importantes en radiación difusa.

2) Con la densidad de los hilos el comportamiento frente a radiación difusa de mallas negras y transparentes es opuesto:

a) En las mallas transparentes de mayor densidad existe un mayor enriquecimiento por el poder difusor de los hilos.

b) En las mallas negras de mayor densidad existe una mayor reducción de la transmisividad a radiación difusa por tener hilos opacos.

3) El ángulo de incidencia tiene un efecto mucho mayor en las mallas transparentes más densas, por lo que las oscilaciones de radiación bajo ellas a lo largo del día (cenit-mediodía-ocaso) serán mayores.

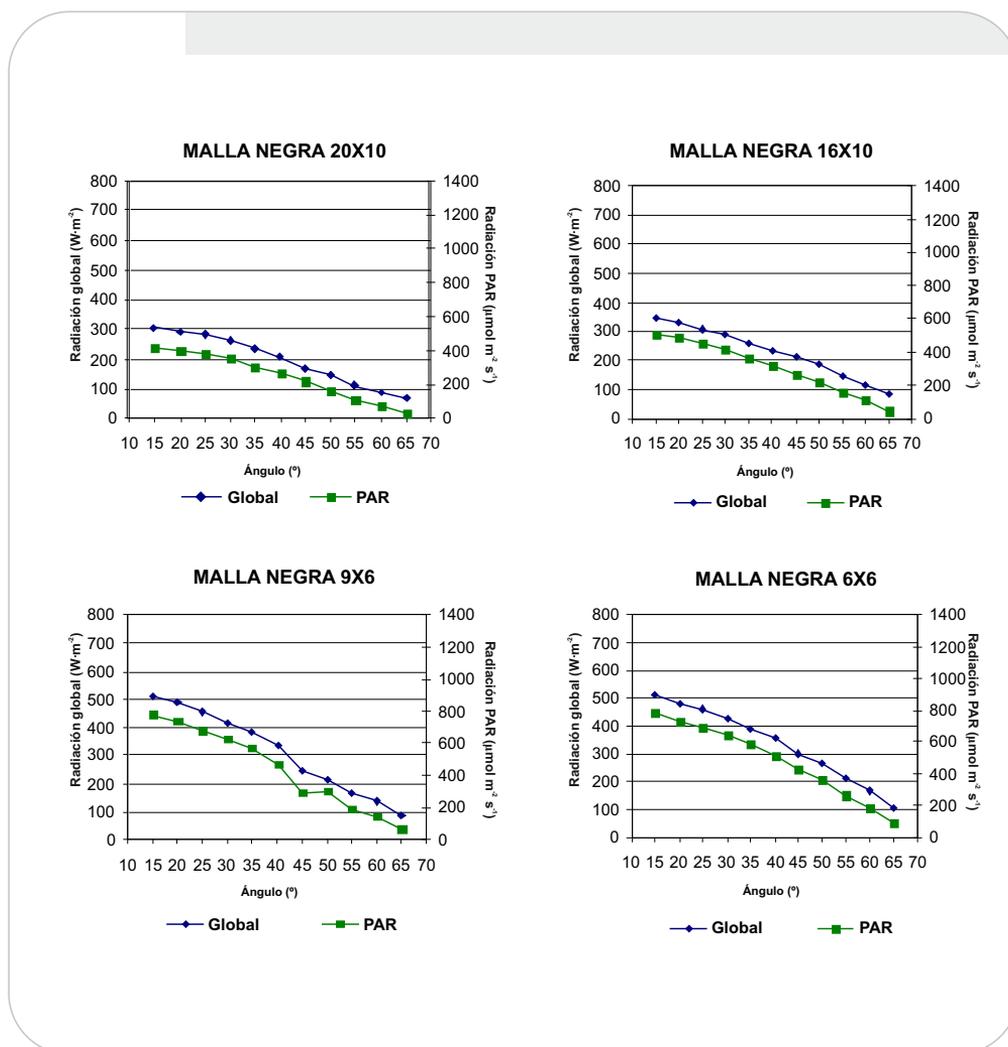
### 4.3. Estudio comparativo del comportamiento de las mallas caracterizadas para la radiación solar global, PAR y difusa

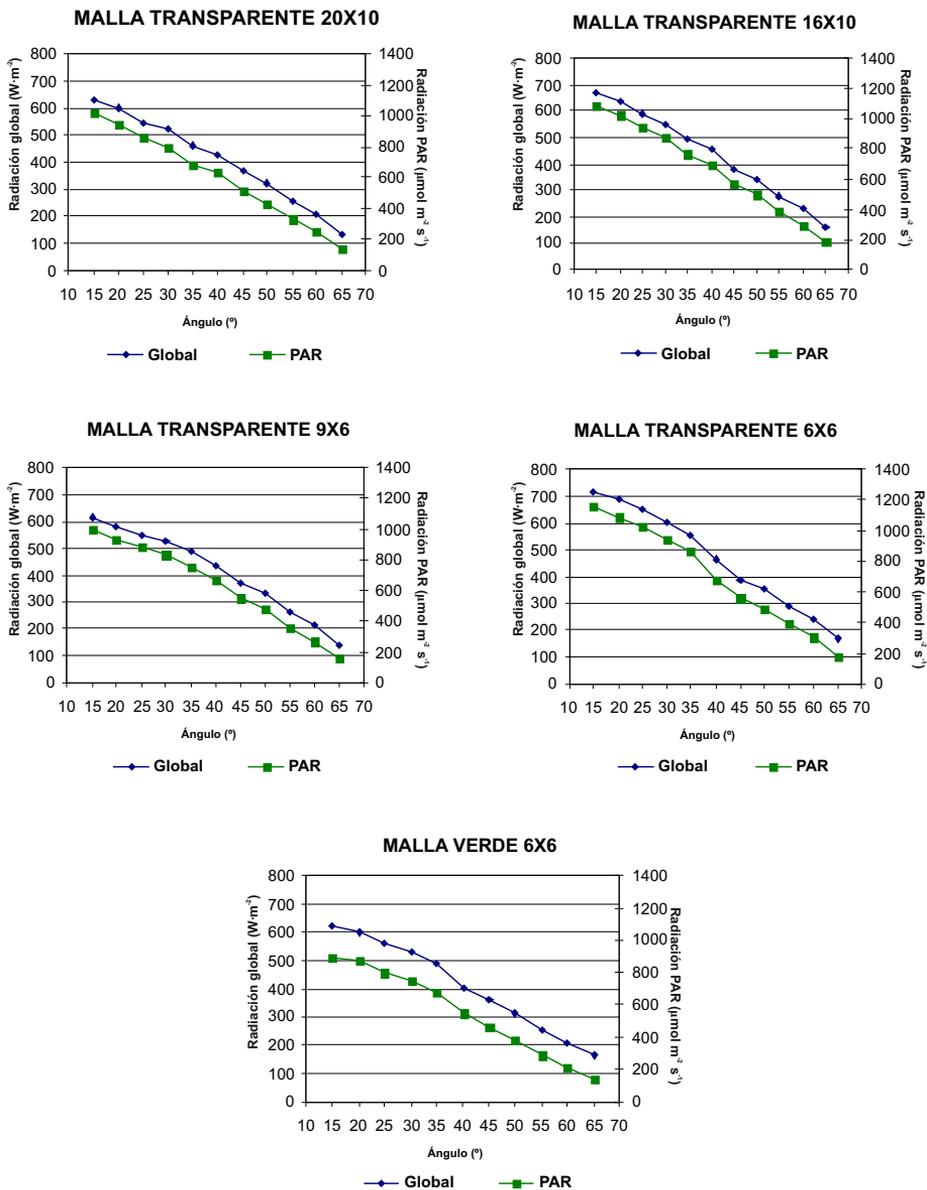
La cantidad de radiación solar global y PAR bajo malla depende del ángulo de incidencia, del color de la malla y la densidad de los hilos. La figura 8 representa ambas radiaciones bajo malla en función del ángulo de incidencia. Aunque no podemos comparar los valores absolutos al venir ambas radiaciones expresadas en distintas unidades, sí podemos observar la separación entre las líneas que representan ambas radiaciones, lo que nos dará una idea del comportamiento de las mallas para los distintos ángulos de incidencia. Esta separación fue similar para todas las mallas excepto para la malla verde donde se observa una mayor separación de las curvas, pues existe una reflexión importante en la longitud de onda del verde (500 nm a 600 nm) hacia el exterior.

El ángulo de incidencia afectó de forma similar a los dos tipos de radiación; la cantidad de radiación disminuye conforme aumenta el ángulo, y es que, para ángulos de incidencia altos la perpendicularidad de los rayos solares incidentes con la malla disminuye y, por tanto la radiación transmitida es menor. La variación de la radiación global y PAR con el ángulo de incidencia en las mallas transparentes fue mayor que en las mallas negras, como muestra la mayor pendiente de las líneas que representan ambas radiaciones bajo la malla.

Sin embargo, en las mallas negras existe una mayor variación en la radiación global y PAR registradas bajo las mallas con la densidad de hilos. Con la malla negra de menor densidad (6x6) se

obtuvieron variaciones de radiación superiores ( $406 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para la radiación global y  $699 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para la radiación PAR) a los que se obtienen en la malla negra de mayor densidad (20x10) ( $242 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para la radiación global y  $395 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para la radiación PAR). Sin embargo, en las mallas transparentes la variación con el ángulo de incidencia es similar para todas las densidades de malla, estando en todas ellas entre  $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $570 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para la radiación global y entre  $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $450 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  para la radiación PAR.





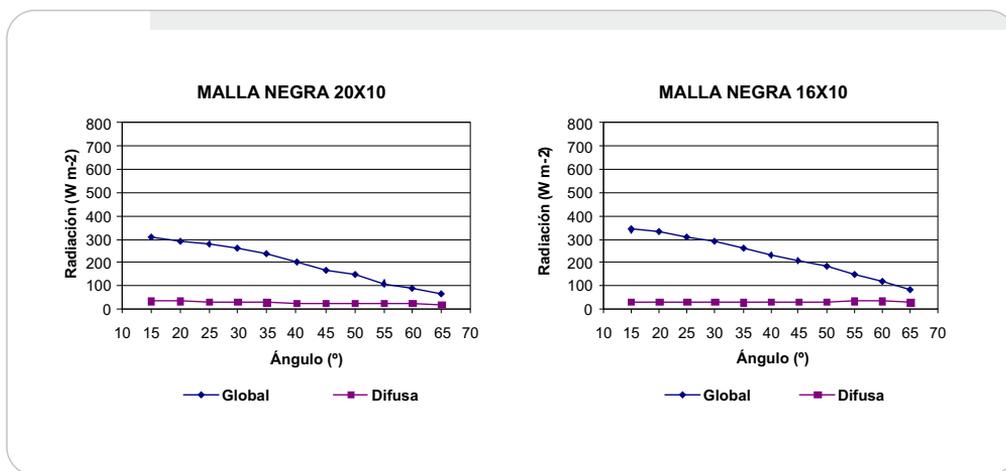
**Figura 8.** Radiación solar global ( $W \cdot m^{-2}$ ) y radiación solar PAR ( $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) bajo malla en función de los ángulos de incidencia ( $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$  y  $65^\circ$ ) para las mallas negras  $20 \times 10, 16 \times 10, 9 \times 6$  y  $6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$ , para las mallas transparentes  $20 \times 10, 16 \times 10, 9 \times 6, 6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$  y malla verde  $6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$

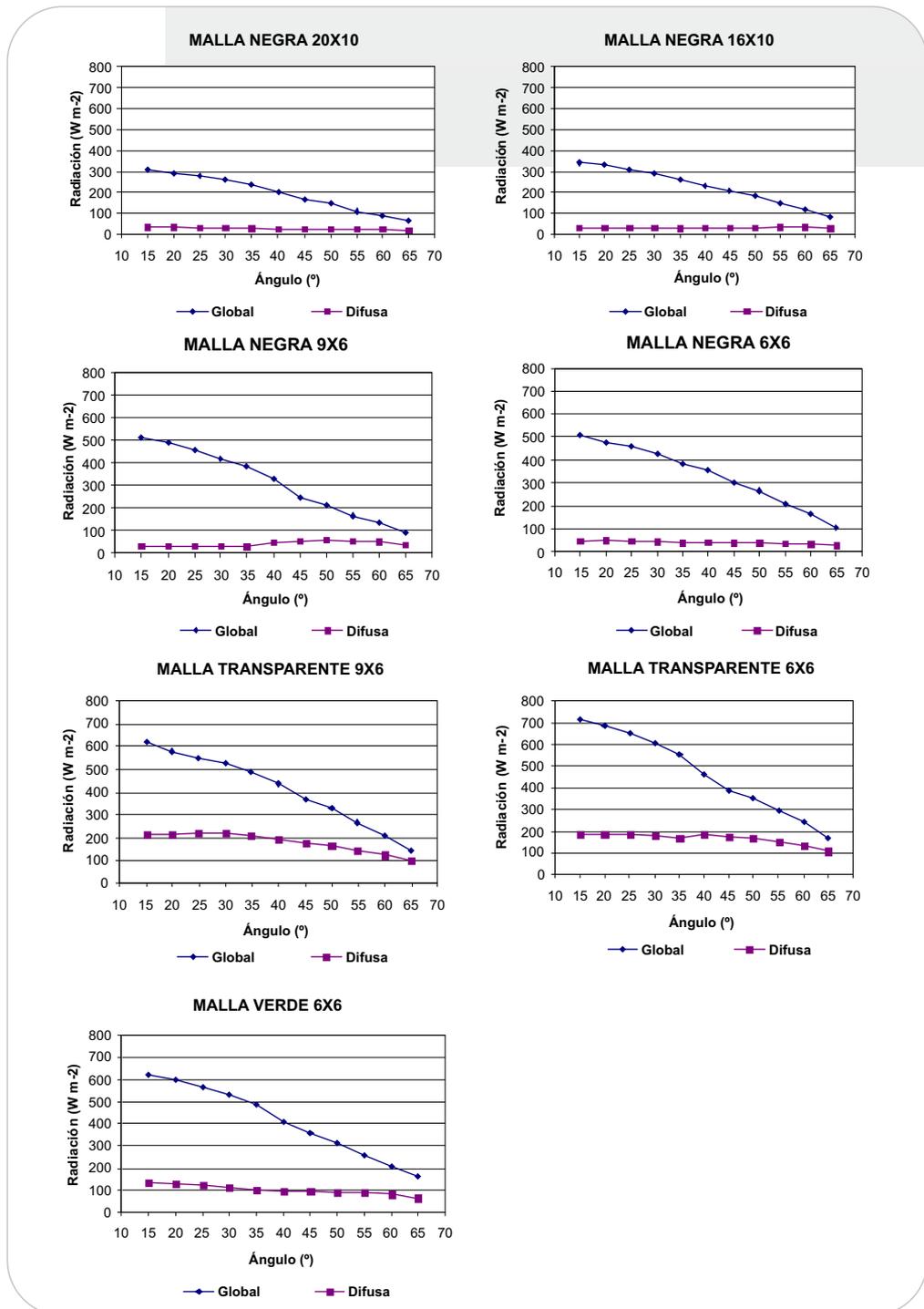
Por último, aunque no podemos comparar los valores numéricos de ambas radiaciones directamente, sí se puede apreciar que en las mallas más difusoras (transparentes) hubo un mayor porcentaje de radiación PAR respecto a radiación global transmitida, coincidiendo con autores como Castilla (2007), que determina que la proporción de radiación PAR respecto a radiación global aumenta con la difusión.

La comparación entre radiación solar global y difusa bajo malla en función del ángulo de incidencia para las mallas estudiadas, se muestra en la figura 9. Las medidas se realizaron en días totalmente despejados en los que la mayor parte de la radiación solar que incide sobre la malla fue directa y sólo una pequeña parte de la radiación estuvo constituida por radiación solar difusa (Castilla, 2007).

La línea que representa la radiación difusa está próxima a la horizontal en todas las gráficas. La radiación difusa se ve menos afectada por la inclinación de la malla, ya que procede de todas las direcciones del espacio.

Como indica la separación entre las líneas que representan ambas radiaciones, en términos generales, las proporciones de radiación difusa frente a la radiación global en las mallas transparentes y la malla verde fueron más altos que en las mallas negras, ya que, al ser sus hilos traslúcidos poseen un gran poder de difusión de la radiación incidente sobre ellos. Este efecto fue notable en las mallas transparentes de mayor densidad (20x10 y 16x10), dónde la radiación difusa representa una fracción importante de la radiación global solar que atraviesa la malla especialmente para ángulos de incidencia bajos. En este caso, el ángulo de incidencia sí tuvo influencia en la radiación difusa transmitida.





**Figura 9.** Radiación solar global ( $W \cdot m^{-2}$ ) y radiación solar difusa ( $W \cdot m^{-2}$ ) bajo malla en función de los ángulos de incidencia ( $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $65^\circ$ ) para las mallas negras  $20 \times 10$ ,  $16 \times 10$ ,  $9 \times 6$  y  $6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$ , para las mallas transparentes  $20 \times 10$ ,  $16 \times 10$ ,  $9 \times 6$ ,  $6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$  y malla verde  $6 \times 6$  hilos  $\cdot cm^{-2}$

Por tanto, y coincidiendo nuevamente con Castellano y col. (2008a) fueron las mallas de hilos transparentes las más adecuadas para maximizar la transmisión de la radiación difusa. Este enriquecimiento en radiación difusa es muy importante para las plantas de crecimiento indeterminado, pues permite que la planta (mediante entutorado) intercepte más radiación mediante la estratificación de los diversos pisos foliares, incrementando de forma efectiva la superficie potencial fotosintética (hay más hojas con luz) y, por tanto, la producción total de asimilados (Soriano, 2002).

## 5. Conclusiones

- El bastidor ha resultado un instrumento válido para cuantificar la radiación solar global, PAR y difusa bajo las mallas, y determinar la curva característica de transmisividad a radiación solar global y PAR y el cociente entre la radiación difusa bajo malla y la radiación difusa exterior de las nueve mallas estudiadas en función de los diversos ángulos de incidencia de los rayos solares sobre la superficie de dichas mallas, en condiciones de campo.

- La transmisividad a radiación solar de las mallas depende tanto de sus características (color, calibre, diámetro del hilo y porosidad) como del ángulo de incidencia de los rayos solares sobre ellas.

- El comportamiento relativo de las diferentes mallas estudiadas frente a radiación solar global y PAR es muy similar. A medida que aumenta el ángulo de incidencia van disminuyendo los valores de transmisividad. Las mallas transparentes poseen mayor transmisividad, seguidas de la malla verde y de las mallas negras, para igual densidad de hilos. A igualdad de color, son las mallas con menor densidad de hilo y mayor porosidad (6x6) las mallas más transmisivas. La malla verde está más próxima al comportamiento transmisor de las mallas transparentes para la radiación global mientras que en el caso de la radiación PAR sus valores de transmisividad son relativamente menores. La variación de transmisividad con el grosor y la densidad de los hilos es mayor en el caso de las mallas negras que en las transparentes.

- Existe una tendencia opuesta en el porcentaje de variación máxima producida en la transmisividad a radiación global y PAR con la densidad de hilos de las mallas negras y transparentes, alcanzando los valores más altos las mallas negras de mayor porosidad y las mallas transparentes de porosidad inferior.

- La variación de la radiación global y PAR con el ángulo de incidencia en las mallas transparentes es mayor que en las mallas negras. En la malla verde existe una reflexión importante en la longitud de onda del verde hacia el exterior.

- Las mallas transparentes consiguen enriquecimientos importantes en radiación difusa.

- En las mallas más difusoras (transparentes) se observa un mayor porcentaje de transmisión de radiación PAR respecto a radiación global.

- Con la densidad de los hilos el comportamiento frente a radiación difusa de mallas negras y transparentes es opuesto. En las mallas transparentes de mayor densidad existe un mayor enriquecimiento por el poder difusor de los hilos. En las mallas negras de mayor densidad existe un menor enriquecimiento por tener hilos opacos. El ángulo de incidencia tiene un efecto mucho mayor en las mallas transparentes más densas, por lo que las oscilaciones de radiación bajo ellas a lo largo del día serán mayores.

- Este estudio nos demuestra que las mallas de hilos transparentes son las más adecuadas para maximizar la transmisión de la radiación difusa. Su utilización, por tanto, resulta beneficiosa en agricultura protegida de interior, pues permite una modificación específica de la luz del sol, además de una mejora del microclima y protección de los cultivos en primavera-verano.

- Sería necesario continuar con trabajos de caracterización de mallas para los diferentes usos agrícolas.

## 6. Bibliografía

Adams, S.R., Valdes, V.M., Hamer, P.J.C., Bailey, B.J. 2000. Spatial variation and comparison of yield of tomatoes grown in small experimental compartments with those in large commercial units. *Acta Horticulturae* 534: 93-100.

Baille, A., and Tchamitchian, M. 1993. Solar radiation in greenhouses. *Crop Structure and Light Microclimate* 93-105.

Baille, A. 1999. Energy cycle. In: *The Greenhouse Ecosystem*. Chapter XI (Stanhill G; Enoch H Z eds), 265-286.

Baille, A., Kittas, C., Datsoula, N. 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 293-306.

Baille, A., Gonzalez-Real, M.M., López, J.C., Cabrera, J., Pérez-Parra, J. 2003. Characterization of the solar diffuse component under “parral” type Greenhouses. *Acta Horticulturae* 614: 341-346.

Baraldi, R., Rapparini, F., Bertazza, G. Rotondi, A. 1998. Effect of simulated light environment on growth and leaf morphology of peach plants. *The journal of Horticultural Science and Biotechnology* 73 (2), 251-258.

Basiaux, P., Deltour, J., Nisen, A. 1973. Effect of diffusion properties of greenhouse covers on light balance in the shelters. *Agricultural Meteorology* 11: 357-372.

Burek, S.A.M., Norton, B., Probert, S.D. 1989. Transmission and forward scattering of insolation through plastic greenhouse cladding materials. *Acta Horticulturae* 245: 498-504.

Cabrera, F.J., Baille, A., López, M.M., González-Real, J., Pérez-Parra, J. 2009. Effects of cover diffusive properties on the components of greenhouse solar radiation. *Biosystems Engineering* 103: 344-356.

Castellano, S., Russo, G., Scarascia Mugnozza, G. 2006. The influence of construction parameters on radiometric performances of agricultural nets. *Acta Horticulturae* 718: 283-290.

Castellano, S., Hemming, S., Russo, G. 2008a. The influence of colour on radiometric performances of agricultural nets. *Acta Horticulturae* 801, 227-235.

Castellano, S., Candura, A., Mugnozza, G.S. 2008b. Relationship between solidity ratio color and shading effect of agricultural nets. *Acta Horticulturae* 801: 253-258.

Castilla, N. 2007. *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo*. Ediciones Mundi Prensa. 462 pp.

Cockshull, K. E., Graves, C. J., Cave, C. R. J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomato. *Journal of Horticultural Science* 67: 11-24.

Cohen, S. and Fuchs, S. 1999. Measuring and predicting radiometric properties of reflective shade nets and thermal screens. *Journal Agricultural Engineering Resource* 73: 246-255.

Day, W. and Bailey, B.J. 1999. Physical principles of microclimate modification. *Greenhouse ecosystems* 71-96.

Dayan, E., Enoch, Z.J., Fuchs, M., Zipori, I. 1986. Suitability of greenhouse building types and roof cover materials for growth of export tomatoes in the Besor region of Israel. I. Effect on climatic conditions. *Biotronics* 15: 61-70.

DeLucia, E.H., Nelson, K., Vogelmann, T.C., Smith, W.K. 1996. Contribution of intercellular reflectance to photosynthesis in shade leaves. *Plant, Cell and Environment* 19: 159-170.

Dufie, J.A. and Beckman, W.A. 1980. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley and Sons.

Ehret, D.I., Jolliffe, P.A., Molnar, J.M. 1989. Lighting for greenhouse vegetable production: an overview. *Canadian Journal of Plant Science* 69: 1309-1326.

Espi, E., Salmerón, A., Fontecha, A., García-Alonso, Y., Real, A.I. 2006. New ultrathermic films for greenhouse covers. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 22: 59-68.

Gu, L., Baldocci, D., Verma, S.B., Black, T.A., Vesala, T., Falge, E.M., Dowty, P.R. 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research* 107(D6).

Hanan, J.J. 1998. *Greenhouses. Advanced technology for protected horticulture*. CRC Press 684.

Hemming, S., Van de Braak, N.J., Dueck, T.A., Jongschaap, R.E.E., Marissen, N. 2006. Filtering natural light by the greenhouse covering using model simulations-more production and better quality by diffuse light. *Acta Horticulturae* 711: 105-110.

Hemming, S., Dueck, T., Janse, J., Van Noort, F. 2008. The effect of diffuse light on crops. *Acta Horticulturae* 801: 1293-1300.

Jongschaap, R.E.E., Dueck, T.A., Marissen, N., Hemming, S., Marcelis, L.F.M. 2006. Simulating seasonal patterns of increased greenhouse crop production by conversion of direct radiation into diffuse radiation. *Acta Horticulturae* 718: 315-322.

Kittas, C. and Baille, A. 1998. Determination of the spectral properties of several greenhouse cover materials and evaluation of specific parameters related to plant response. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71: 193-202.

Kittas, C., Baille, A., Giaglaras, P. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73: 341-351.

Kurata, K. 1992. Two dimensional analysis of irradiance distribution at canopy foliage in relation to the diffusivity of films of plastic houses. *Acta Horticulturae* 303: 113-120.

Mc Cree, K.J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically radiation against leaf photosynthesis data. *Agriculture Meteorology* 10: 443-456.

Mermier, M. and Baille, A. 1980. The optical properties of plastic materials for greenhouse and screen. *Plasticulture* 77: 11-24.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S., Teitel, M. 2003. Micrometeorological characterisation in a screenhouse. *Acta Horticulturae* 614: 445-452.

Montero, J.I., Antón, A., Hernández, J., Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Horticulturae* 559: 203-209.

Oren-Shamir, M., Gussakovsky, E.E., Shpiegel, E., Nissim-Levi, A., Ratner, K., Ovadia, R., Giller, Yu.E., Shahak, Y. 2001. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *Journal Horticulturae Science Biotechnology* 76: 353-361.

Pearson, S., Wheldon, A.E., Hadley, P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 62: 61-70.

Pollet, I.V., Pieters, J.G., Deltour, J., Verschoore, R. 2005. Diffusion of radiation transmitted through dry and condensate covered transmitting materials. *Solar Energy Material and Solar Cells* 86: 177-196.

Raviv, M. and Allingham, Y. 1983. Characteristics of modified polyethylene films. *Plasticulture* 59: 3-12.

Roderick, M.L., Farquhar, G.D., Berry, S., Noble, I.R. 2001. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia* 129: 21-30.

Romacho, I., Hita, O., Soriano, T., Morales, I., Escobar, I., Suárez-Rey, E.M., Hernández, J., Castilla, N. 2006. The growth and Yield of cherry tomatoes in net covered greenhouses. *Acta Horticulturae* 719: 529-534.

Seemann, J., Chirkov, Y.I., Lomas, J., Primault, B. 1979. *Agro-meteorology*. Editorial Springer-Verlag.

Shahak, Y., Gussakovsky, E.E., Gal, E., Ganelevin, R. 2002. ColorNets: Crop protection and light-quality manipulation in technology. *Acta Horticulturae* 659: 143-151.

Shahak, Y. and Gussakovsky, E.E. 2004. ColorNets: Crop Protection and Light-Quality Manipulation in One Technology. *Acta Horticulturae* 659: 143-151.

Shahak, Y. Gussakovsky, E., Cohen, Y. and Lurie, S. 2004. Color Nets: A New Approach for Light Manipulation in Fruit Trees. *Acta Horticulturae* 636: 609-616.

Shahak, Y. 2007. Photoselective shade netting for improved production of ornamental, fruit and vegetable crops. An overview. *Book of Abstracts. GreenSys 2007*. 151-152.

Shahak, Y., Ben-Yakir, D., Matan, E., Yehezkel, H., Posalski, I., Messika, Y., Zohar, H., Ratner, K., Gal, E., Offir, Y. 2007. Photoselective shade nets improve productivity of bell peppers. *Book of Abstracts. GreenSys 2007*. 222-223.

Shumin, L. Rajapakse, N.C., Young, R.E., Oi, R. 2000. Growth responses of chrysanthemum and bell pepper transplants to photoselective plastic. *Scientia Horticulturae* 84: 215-225.

Sica, C. and Picuno, P. 2008. Spectro-radiometrical characterization of plastics nets for protected cultivation. *Acta Horticulturae* 801: 245-252.

Smith, H. 1982. Light quality, photoperception and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology* 33: 481-518.

Soler, A., Van Der Blom, J., López, J.C., Gázquez, J.C., Cabello, T. 2007. Eficacia de las mallas de 20 x 10 hilos ante el paso de Bemisia Tabaci. XXXVII Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura. 1005-1009.

Soni, P., Salokhe, V. M., Tantau, H. J. 2005. Effect of screen mesh size on vertical temperature distribution in naturally ventilated tropical greenhouses. *Biosystems Engineering* 92 (4): 469-482.

Soriano, T. 2002. Validación de un modelo de cálculo de transmisividad a radiación solar directa en invernadero mediante maquetas a escala y determinación del prototipo óptimo para la costa mediterránea. Tesis doctoral Universidad de Almería. 274pp.

Soriano, T., Morales, M.I., Hita, O., Romacho, I. 2006. Cultivos estivales bajo mallas plásticas. *Horticultura* 192, 14-18.

Soriano, T., Hernández, J., Morales, M.I., Escobar, I., Castilla, N. 2008. Bastidor para la medida de transmisividad a radiación solar de materiales de protección de cultivos. Boletín oficial de la propiedad industrial de fecha 10 de Marzo de 2008.

Spitters, C.J.T. 1986. Separating the diffuse and direct components of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 231-242.

Stanhill, G. and Cohen, S. 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction of global radiation with discussion of its probable causes and possible horticultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 255-278.

Tovar, J., Olmo, F.J., Batlles, F.J., Alados-Arboledas, L. 2001. Dependence of one-minute global irradiance probability density distributions on hourly irradiation. *Energy* 26: 659-668

Teitel, M. 2006. The effect of screens on the microclimate of greenhouses and screenhouses-a Review. *Acta Horticulturae* 719: 575-586.

UNI 1994. Italian National Standard 10335, Nets for agricultural applications-determination of the shading power of nets of polyethylene fibre. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Italy.

Vogelmann, T.C., Bornman, J.F., Yates, D.J. 1996. *Physiologia Plantarum*, 98: 43-56.

Wang, S. and Deltour, J. 1999. Studies on thermal performance of a new greenhouse cladding material. *Agronomie* 19: 467-475.



**CAPÍTULO 5.**  
VALIDACIÓN DEL MODELO  
TRADESMA PARA EL CÁLCULO DE  
TRANSMISIVIDAD A LA RADIACIÓN  
SOLAR DIRECTA EN ESTRUCTURAS  
DE MALLAS

---





# 1. Introducción

La radiación solar es un factor ambiental de gran importancia en los invernaderos, ya que determina los principales procesos fisiológicos de los cultivos. Así, la productividad bajo invernadero depende, sobre todo, de la radiación solar y de sus variaciones a lo largo del año (Elsner y col., 2000). Por ello, la mejora de la transmisión de radiación al interior del mismo se considera como un objetivo clave para aumentar la calidad y cantidad de producción (Cockshull, 1989; Castilla y López-Gálvez, 1994).

La transmisividad total de un invernadero se define como la fracción de la radiación solar global incidente sobre el invernadero que logra alcanzar el interior del mismo (Zabeltitz, 1998). Los elementos que componen la estructura del invernadero y el material de cubierta son los principales responsables de la reducción de la radiación en su interior. La transmisividad se puede optimizar diseñando cuidadosamente la geometría de la cubierta (Soriano y col., 2004).

Los modelos de simulación en agricultura comenzaron a utilizarse a finales de los años 70, pero su uso en horticultura protegida se generalizó dos décadas después (Heuvelink y col., 1995; Challa, 2001). En 1967, Manbeck y Aldrich desarrollaron el primer modelo relacionado con estudios sobre la radiación en invernaderos para la caracterización de la transmisividad a la radiación solar en invernaderos unimodulares (Critten, 1993). Se han desarrollado modelos para el estudio de la radiación solar incidente sobre invernaderos, para la estimación de la transmisividad de diversas estructuras de protección y para simulación de la penetración de la radiación a través de un dosel vegetal que la intercepte en mayor o menor medida.

Los modelos de Critten (1993) y Bot (1983) destacan por la innovación que supusieron en su momento y por su alto grado de precisión. Su repercusión los ha convertido en clásicos para la modelización de la transmisión de radiación solar en invernadero Venlo, constituyendo la base de otros muchos modelos desarrollados con posterioridad. El primero de ellos incluye polarización y reflexiones hasta de cuarto orden, partiendo de las leyes de Fresnel, modificadas por Holmes. Evalúa invernaderos en función de la pendiente de cubierta y de la altura de los lados. Considera las pérdidas estructurales tratando los elementos como cilindros y luego combinando estas pérdidas con las de la cubierta. El modelo de Bot, por su parte, utiliza también las mismas leyes físicas y considera las reflexiones. La diferencia estriba en que calcula transmisividades de cubierta y de elementos estructurales pero considerando las secciones como trapezoidales. El de Bot será el modelo de partida para el simulador que se validará en este trabajo.

Posteriormente, se han desarrollado un número importante de modelos de simulación numérica sobre el comportamiento de la radiación al atravesar las estructuras y los materiales usados como cubierta de invernadero, su distribución espacial dentro del mismo y del cultivo (Soriano y col., 2004). Como ejemplos podemos citar el de Wang y Boulard (2000) (transmisividad a la radiación directa en túneles plásticos unicapilla), Pollet y Pieters (2002) (transmisividad a radiación PAR en invernaderos de plástico y cristal), González-Real y col. (2003) (transmisividad en invernaderos plásticos tipo parral), Soriano y col. (2004) (transmisividad en invernaderos simétricos y asimétricos), Vougioukas y Sapounas (2005) (transmisividad a radiación solar global en invernaderos con diferente orientación) y Hernández (2009) (transmisividad a la radiación solar directa, no polarizada, incidente sobre invernaderos plásticos de techo curvo y rectilíneo).

Una técnica de validación es la utilización de invernaderos a escala que permiten probar el modelo de forma sencilla y económica en una gran cantidad de escenarios. La utilización de estas maquetas a escala también es una técnica común, por ejemplo para estudios de ventilación (Boulard y col., 1998; Oca y col., 1999; Montero y Antón, 2003; Jiménez-Hornero y col., 2005 y 2006) y ya ha sido utilizada por diversos investigadores para realizar estudios de transmisividad: en invernaderos tipo "lean-to" (Li y col., 1995; Kurata, 1995), para transmisión de radiación y pérdida de calor (Swinkels y col., 2001), para transmisividad solar de invernaderos monocapilla (Papadakis y col., 1998) o para transmisividad a radiación solar directa en invernaderos multicapilla (Soriano y col., 2004).

La maximización de la transmisividad a radiación que se consigue con la orientación este-oeste de los módulos, en invernaderos plásticos en época invernal respecto a las demás

orientaciones, se considera suficientemente probada. No obstante, Jaffrin y Urban (1990) determinaron que la orientación este-oeste, siendo óptima para la captación de luz, actúa en detrimento de la uniformidad ya que en ella las áreas sombreadas tienden a afectar las mismas franjas de cultivo durante todo el día y a lo largo de periodos de varios días. Kurata (1990), además de ratificar la mejor transmisividad de la orientación este-oeste frente a las demás, afirmó que en los invernaderos con dicha orientación los efectos de la pendiente de cubierta son más importantes que en los orientados norte-sur. También determinó que en un monocapilla orientado este-oeste la transmisividad crece con la pendiente (hasta ciertos límites) mientras que un multicapilla tiene un ángulo óptimo. Nisen (1969) citado por Elsner y col. (2000), concluyó que la transmisividad aumenta al incrementar la inclinación de la cubierta en estructuras a dos aguas, y que la transmisividad es menor para la orientación este-oeste en verano que la norte-sur.

Hay escasa información de las condiciones radiativas generadas bajo estructuras de malla que permita optimizar el diseño, tanto en cuanto a la geometría de la cubierta como a los materiales utilizados. El uso de modelos de cálculo y de maquetas a escala para validarlos se contempla como una buena opción para determinar estructuras óptimas para el cultivo estival en comarcas de interior. Desmarais y col. (1999) estudiaron mediante datos experimentales y simulación con modelos matemáticos, cuatro tipos de invernaderos de malla diferentes y determinaron la transmisividad de la cubierta, además de la tasa de ventilación natural y el coeficiente de transferencia de calor, como los parámetros claves para el diseño y modelización de tales estructuras. Moller y col. (2004) emplearon modelos de simulación para determinar la evapotranspiración en un invernadero de malla.

El grupo de Horticultura del IFAPA de Granada, puso a punto, en colaboración con el Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries, Centro de Cabrils (IRTA), un modelo para el cálculo de la transmisividad a la radiación solar de invernaderos mediterráneos (TRADINMED) (Soriano y col., 2004) partiendo del modelo de Bot (1983). Este modelo es, a su vez, el punto de partida para la obtención del modelo de transmisividad a radiación de estructuras de malla (TRADESMA) cuya validación se aborda en este trabajo.

El modelo propuesto parte de las leyes básicas de reflexión y refracción y calcula tres tipos de transmisividad a la radiación solar directa: la del material de cubierta, la de los elementos estructurales longitudinales de la cubierta, y la de los elementos transversales de la misma. La transmisividad total viene dada por el producto de las tres. En el cálculo se tienen en cuenta las reflexiones de primer orden provocadas por la cubierta de un módulo que vuelven a incidir sobre la

cubierta del módulo adyacente. El cálculo se realiza cada seis minutos, desde el momento de la salida hasta la puesta del sol. Modificando el día juliano y la latitud, el modelo predice la transmisión a la radiación solar a lo largo de todo el año y para distintas ubicaciones. Así mismo, se pueden modificar variables como la orientación y las pendientes de los dos lados de la cubierta. Otros parámetros modificables son las dimensiones y características de los elementos estructurales y el material de cubierta. Con ello, la versatilidad del modelo se hace muy amplia, constituyendo una herramienta de gran utilidad en un extenso abanico de condiciones.

Una limitación que presenta este modelo es que no considera la radiación difusa incidente, por lo que en condiciones de alta incidencia de días nublados sus resultados no son válidos. Otra limitación del modelo es que no estima las reflexiones de segundo orden. El papel de las reflexiones es esencial en la radiación percibida en invernaderos de pendientes de cubierta elevadas (Schultz, 1985, citado por Critten, 1993; Kurata, 1995, 1999; Papadakis y col., 1998) y es que, el reparto de la radiación a lo ancho de un módulo se ve seriamente influido por las reflexiones, variando la distribución de estas a lo ancho del perfil transversal del módulo en función de la pendiente del invernadero (Soriano, 2002).

El modelo TRADINMED fue validado con maquetas a escala para la orientación este-oeste del eje del invernadero.

Para la validación del nuevo modelo matemático generado (TRADESMA), también se utilizan maquetas a escala y en este caso, se probará con distintas orientaciones. En algunos casos, las medidas en maquetas a escala se consideran más representativas que los modelos de simulación porque muchas de las simplificaciones consideradas en los cálculos se pueden evitar con la medida directa en condiciones más realistas. En este caso se utilizarán las medidas de transmisividad a radiación obtenidas en ellas para la comparación de varias pendientes de cubierta y orientaciones de invernaderos de cubierta de malla.

## 2. Objetivos

1. Adaptación del modelo de cálculo de transmisividad a radiación solar directa en invernaderos mediterráneos (TRADINMED) al cálculo de la transmisividad a radiación solar directa en invernaderos de malla, obteniendo el nuevo modelo TRADESMA.

2. Validación del modelo matemático TRADESMA para el cálculo de transmisividad a la radiación solar directa en estructuras de mallas, mediante la utilización de maquetas a escala para distintas pendientes de cubierta y orientaciones del eje del invernadero.

3. Comparación de la transmisividad obtenida bajo las maquetas de estructuras de malla para diversas pendientes y orientaciones .

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Obtención del modelo TRADESMA a partir del modelo TRADINMED

El programa informático empleado es adaptable a una gran variedad de escenarios y situaciones, permitiendo la variación de las características del material de cubierta, de los elementos estructurales, de la geometría de la cubierta, de la localización geográfica y de la época del año.

La transmisividad total a la radiación solar directa calculada por el modelo es el producto de tres transmisividades: la del material de cubierta, la de los elementos estructurales longitudinales y la de los elementos estructurales transversales.

$$\tau_{\text{TOTAL}} = \tau_{\text{MAT}} * \tau_{\text{EL}} * \tau_{\text{ET}}$$

Ecuación 1

donde:

$\tau_{\text{MAT}}$  = Transmisividad del material de cubierta

$\tau_{\text{EL}}$  = Transmisividad de los elementos longitudinales

$\tau_{\text{ET}}$  = Transmisividad de los elementos transversales al módulo

#### 3.1.1. Transmisividad del material de cubierta, $\tau_{\text{MAT}}$

para una hipotética superficie transparente y, a continuación se introduce un factor  $Q$  que incluye la capacidad de absorción del material de cubierta y su espesor. En dicha superficie transparente, se determinarán también las componentes paralela ( $R_{pa}$ ) y perpendicular ( $R_{pe}$ ) de la reflexión al plano de incidencia. Estas componentes se refieren, como hemos mencionado, a una hipotética superficie transparente, sin embargo, el material de cubierta tiene una determinada capacidad de absorción de radiación que viene dada por un factor,  $Q$ , cuyo valor depende del coeficiente de absorción del material,  $C_{abs}$ , específico de cada material y del espesor que atraviesa el rayo incidente,  $D'$ . Este espesor se calcula en función del grosor del material,  $D$ , y de los ángulos de incidencia ( $\theta_i$ ) y refracción ( $\theta_r$ ). Con el valor de capacidad de absorción ( $Q$ ) de nuestro material se obtienen las componentes de reflexión reales del mismo,  $R'_{pa}$  y  $R'_{pe}$ .

Finalmente, el modelo determina las componentes (paralela y perpendicular) de la transmisividad del material de cubierta y la transmisividad total del material para la radiación directa (Soriano, 2002).

En este caso, se utilizaron las medidas de transmisividad de luz directa realizadas por Montero y col. (2001) para la malla nueva utilizada en las maquetas ( $10 \times 15$  hilos  $\cdot$   $\text{cm}^{-2}$ ) en función de los ángulos de incidencia ( $0^\circ$  a  $80^\circ$ ) (tabla 1). Estas medidas se registraron con un goniómetro, en el Instituto de Investigación de Silsoe (Inglaterra).

**Tabla 1.** Valores de la curva de transmisividad a radiación solar directa de una malla nueva ( $10 \times 15$  hilos  $\cdot$   $\text{cm}^{-2}$ ) en función de los ángulos de incidencia ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  y  $90^\circ$ )

ÁNGULO INCIDENCIA	MALLA NUEVA
0	0,890
10	0,874
20	0,863
30	0,856
40	0,827
50	0,780
60	0,747
70	0,651
80	0,607
90	0,000

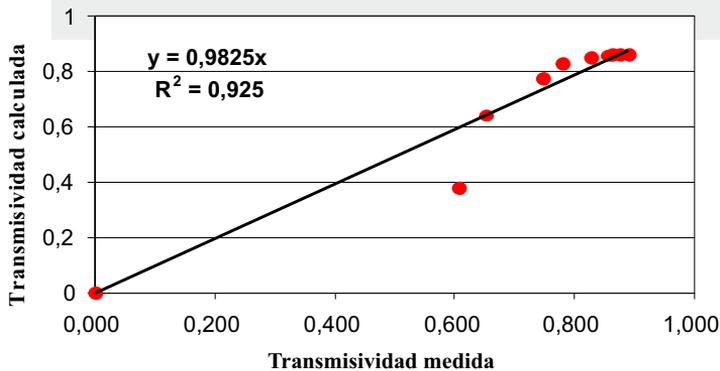
Fuente: Montero y col., 2001

Para obtener el coeficiente de absorción (5) y el índice de refracción (1,69) que se incluyeron en el programa informático, y teniendo en cuenta el espesor real del material (3 mm), se tomaron los valores medidos experimentalmente y los calculados por el procedimiento anterior y se buscó el máximo ajuste de la recta de regresión (figura 1). Los valores resultantes para cada ángulo de incidencia se incluyen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Cálculo de la curva de transmisividad a radiación solar directa de una malla nueva (10x15 hilos-cm<sup>-2</sup>) en función de los ángulos de incidencia (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° y 90°)

i	sen (i)	cos (i)	C	R <sub>pa</sub>	R <sub>pe</sub>	Q	R' <sub>pa</sub>	R <sub>pe</sub>	Reflexión	T <sub>pa</sub>	T <sub>pe</sub>	Tcalculada	Absorción	Tmedida
0	0	1	1,690	0,066	0,066	0,97	0,122	0,122	0,122	0,862	0,862	<b>0,862</b>	0,017	<b>0,890</b>
10	0,03	0,985	1,690	0,069	0,062	0,97	0,128	0,115	0,122	0,855	0,868	<b>0,862</b>	0,017	<b>0,874</b>
20	0,117	0,94	1,686	0,081	0,052	0,97	0,147	0,097	0,122	0,836	0,887	<b>0,861</b>	0,017	<b>0,863</b>
30	0,25	0,866	1,671	0,101	0,035	0,97	0,181	0,067	0,124	0,802	0,917	<b>0,859</b>	0,017	<b>0,856</b>
40	0,413	0,766	1,639	0,132	0,016	0,97	0,23	0,032	0,131	0,752	0,952	<b>0,852</b>	0,017	<b>0,827</b>
50	0,587	0,643	1,585	0,179	0,002	0,969	0,299	0,003	0,151	0,681	0,981	<b>0,831</b>	0,018	<b>0,780</b>
60	0,75	0,5	1,514	0,254	0,007	0,967	0,399	0,014	0,207	0,579	0,969	<b>0,774</b>	0,019	<b>0,747</b>
70	0,883	0,342	1,441	0,38	0,072	0,965	0,544	0,131	0,338	0,433	0,85	<b>0,641</b>	0,021	<b>0,651</b>
80	0,97	0,174	1,384	0,604	0,298	0,964	0,745	0,453	0,599	0,231	0,524	<b>0,377</b>	0,024	<b>0,607</b>
90	1	6E-17	1,362	1	1	0,963	1	1	1	0	7E-30	<b>3E-30</b>	0	<b>0,000</b>

Fuente: Montero y col., 2001



**Figura 1.** Recta de calibración de la transmisividad calculada en función de la transmisividad medida

Fuente: Montero y col., 2001

### 3.1.2. Transmisividad de los elementos estructurales longitudinales ( $\tau_{EL}$ ) y transversales ( $\tau_{ET}$ )

Los elementos estructurales longitudinales de cada uno de los módulos de las maquetas estaban constituidos por barras metálicas redondas de 1,18 m de longitud y 18 mm de diámetro.

Cada módulo constaba de perfiles metálicos (elementos estructurales transversales) de 5 cm de ancho y 1,4 cm de grosor (foto 1).



**Foto 1.** Maqueta de cubierta asimétrica de baja pendiente ( $8^{\circ}$ - $18^{\circ}$ )

### 3.1.3. Integración de la transmisividad a lo largo del día

El modelo utiliza un proceso de cálculo que le permite conocer el ángulo de incidencia de la luz respecto a cada lado de la cubierta en función de la hora solar. Inicialmente, calcula los momentos de salida y puesta del sol. Posteriormente, se calculan los valores de los ángulos de incidencia sobre los dos lados de la cubierta para cada uno de los momentos (a intervalos de 6

minutos) del día. Finalmente, se realiza el proceso de cálculo de las dos componentes de las reflexiones de primer orden,  $R_{pa}$  y  $R_{pe}$ .

### 3.2. Programa informático

El programa se divide en 5 módulos o secciones de cálculo:

- En la primera determina el momento de salida y el momento de puesta del sol entre los que calcula las transmisividades a la radiación cada seis minutos, así como el ángulo de incidencia del rayo sobre la superficie horizontal y sobre los dos lados de la cubierta del invernadero.
- En la segunda de ellas hace un cálculo de la transmisividad del material de cubierta utilizando los datos experimentales de transmisividad introducidos.
- En la tercera se determina la transmisividad de los elementos longitudinales.
- En la cuarta se aborda la transmisividad de los elementos transversales al módulo
- Finalmente, en la quinta determina la transmisividad total como producto de las anteriores desde la salida del sol hasta el ocaso.

En el esquema que se presenta a continuación se puede observar el proceso de cálculo teniendo en cuenta los siguientes significados de las formas utilizadas:



VARIABLES DEL USUARIO RELATIVAS AL CASO ESPECÍFICO QUE SE DESEA CALCULAR

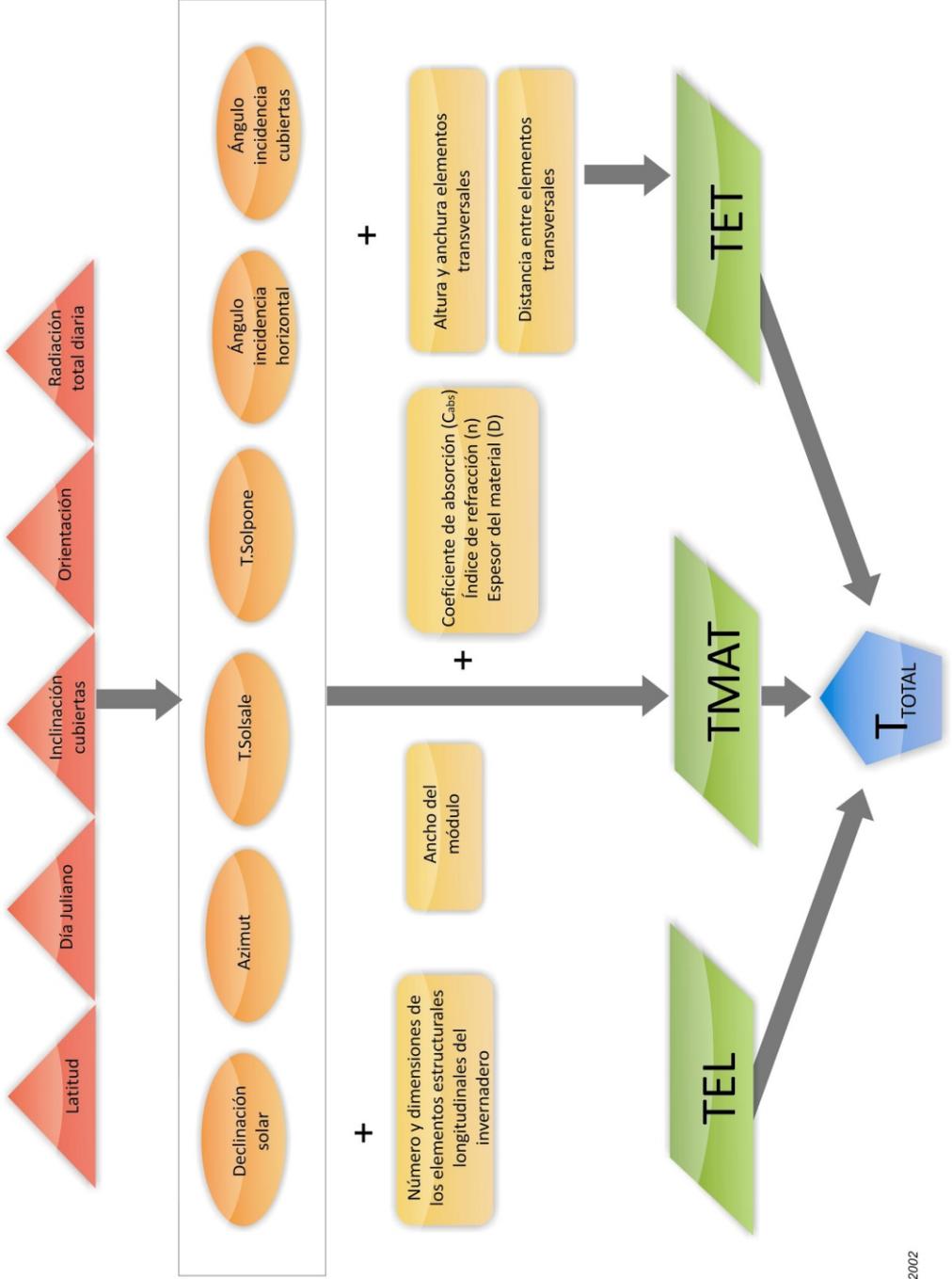


VALORES DE CÁLCULOS INTERMEDIOS QUE REALIZA EL PROGRAMA



CONSTANTES (CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL INVERNADERO) Y VALORES CARACTERÍSTICOS DEL MATERIAL DE CUBIERTA

# PROCESO DE CÁLCULO DE LA TRANSMISIVIDAD



El modelo calcula valores de transmisividad cada 6 minutos a lo largo de las horas de luz. Además, se calcula una media ponderada diaria, para la comparación posterior con los valores medidos en campo.

### 3.3. Maquetas a escala

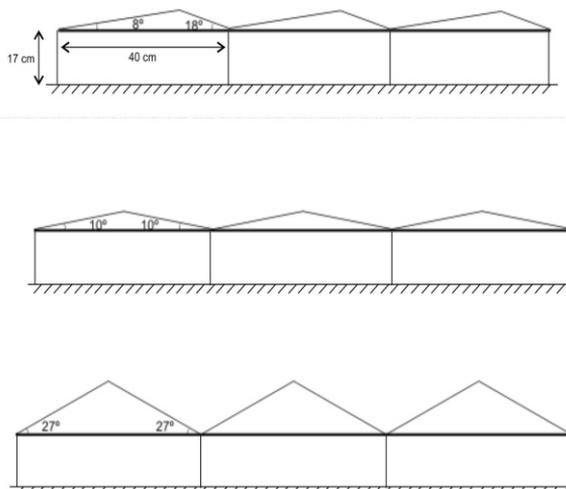
Para la validación del modelo se construyeron tres maquetas con cubierta de malla e instaladas en Granada (latitud  $37^{\circ} 27' N$ ,  $3^{\circ} 35' O$  y 650 m de altitud).

La recogida de datos tuvo lugar durante el periodo en el que se emplean las mallas de sombreado para cultivo de hortícolas en zonas de interior (de Abril-Mayo a Octubre).

#### 3.3.1. Estructura

Las maquetas se construyeron sobre tableros de aglomerado de madera de  $1,20 \times 1,60 \text{ m}^2$  impermeabilizados con pintura negra mate para evitar la reflexión de la radiación solar, colocados sobre bases planas de hormigón de 1 m de altura. La estructura soporte de la cubierta se realizó con perfiles de hierro de 5 cm de anchura pintados también de negro mate por el mismo motivo.

Se construyeron 3 maquetas trimodulares a escala 1:15 con cubierta recta a dos aguas y tres pendientes diferentes ( $8^{\circ}$ - $18^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ,  $27^{\circ}$ - $27^{\circ}$ ) (figura 2). Cada módulo tenía 40 cm de anchura y 17 cm de altura a canalón.



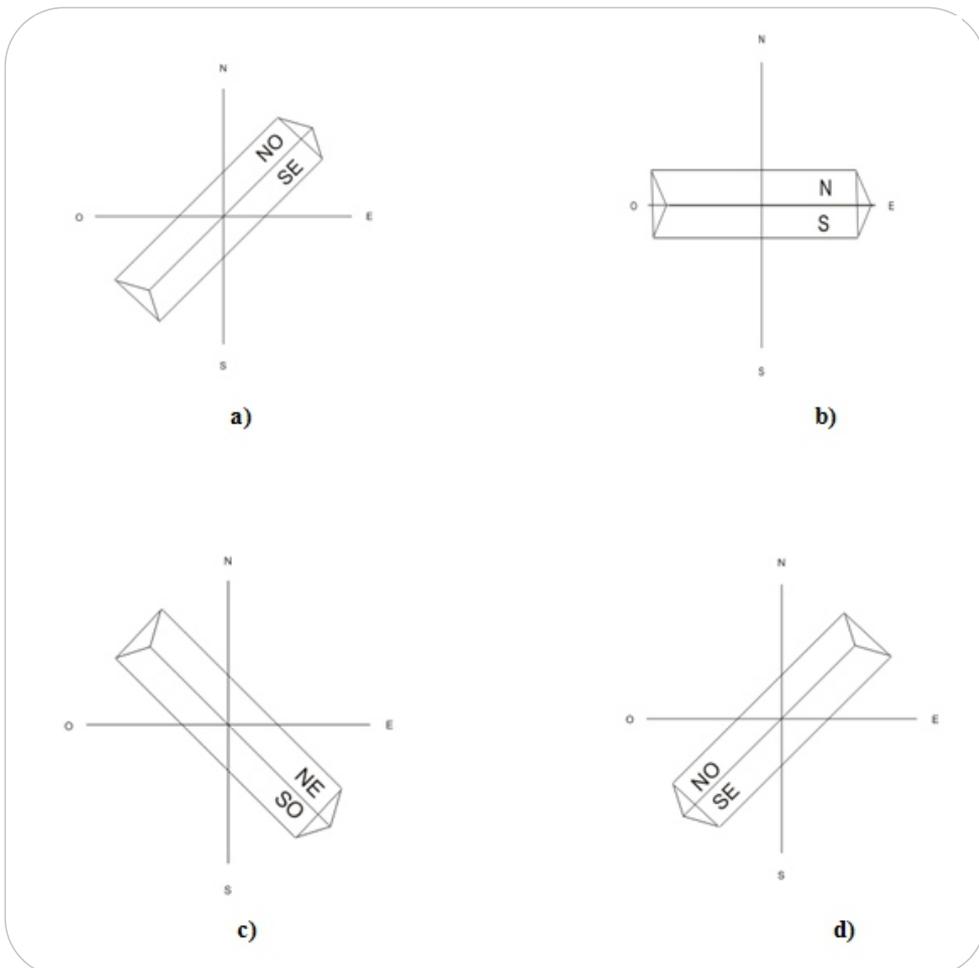
**Figura 2.** Maquetas trimodulares de pendiente  $8^{\circ}$ - $18^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ,  $27^{\circ}$ - $27^{\circ}$

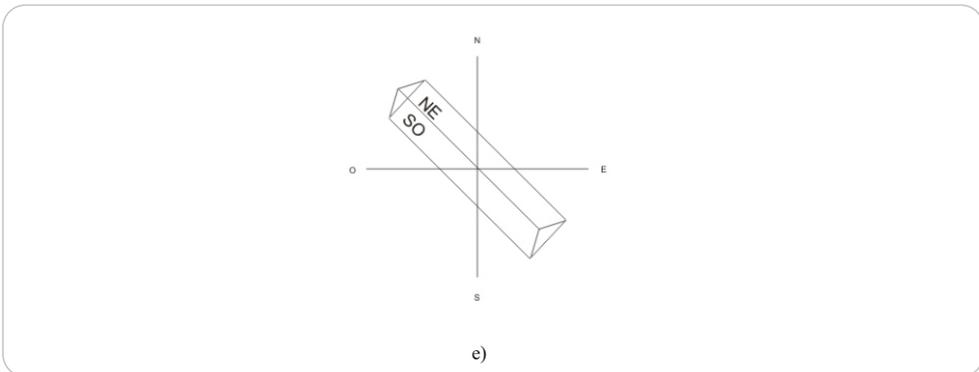
### 3.3.2. Cubierta

Como material de cubierta se utilizó malla plástica blanca (hilos transparentes) de 10x15 hilos-cm<sup>-2</sup> (35% de porosidad, aproximadamente). La malla se cosió a los perfiles y a las barras longitudinales bien tensada en ambas direcciones pero evitando la deformación de la misma.

### 3.3.3. Orientación

Las maquetas se giraron cada 20 días en el sentido de las agujas del reloj a lo largo del periodo de estudio para cubrir 5 orientaciones posibles respecto a la orientación Norte-Sur (figura 2): 45° (Suroeste/Noreste), 90° (Oeste/Este), 135° (Noroeste/Sureste), 225° (Noreste/Suroeste) y 315° (Sureste/Noroeste) (figura 3). Las orientaciones 45° y 225° deberían ser equivalentes para las maquetas simétricas. Igual ocurre con las orientaciones 135° y 315°.





**Figura 3.** Orientaciones de las maquetas respecto a la orientación Norte-Sur: a)  $45^\circ$  (Suroeste/Noreste), b)  $90^\circ$  (Oeste-Este), c)  $135^\circ$  (Noroeste/Sureste), d)  $225^\circ$  (Noreste/Suroeste) y e)  $315^\circ$  (Sureste/Noroeste)

### 3.3.4. Mantenimiento

Diariamente se llevó a cabo la limpieza y nivelación de los sensores por la mañana a primera hora. Periódicamente y cuando fue necesario, se lavaron las mallas con una manguera para eliminar el polvo acumulado, retirando previamente los sensores de su interior.

## 3.4. Medida de radiación

El sistema de medida estaba compuesto por tubos solarímetros TSL de Delta-T. Se instalaron dos en cada maqueta, con su eje longitudinal en la dirección Norte-Sur (debido a la variación direccional en la sensibilidad de estos sensores) y otro más en el exterior de la maqueta, de las mismas características, para el cálculo de la transmisividad. Los sensores lineales son los más adecuados para este tipo de estudios (Heuvelink y col., 1995) dado que dan un valor promedio de la medida de la radiación a lo largo de su longitud y, por tanto, se evita el error que darían los sensores tipo botón, debido a la falta de uniformidad de la radiación bajo la cubierta. En concreto, los tubos utilizados constan de un elemento sensor de 858 mm de longitud y 22 mm de anchura pintado en bandas alternas blancas y negras mates, que proporciona una salida de voltaje proporcional a la diferencia de temperatura alcanzada entre ambas zonas por efecto de la radiación. Como sensor de referencia se utilizó un piranómetro de referencia de primera clase CM6B de Kipp&Zonnen (Norma ISO 9060) con el que se procedió a la calibración de los tubos solarímetros.

Todos los sensores se conectaron a un datalogger CR10X de Campbell. Al ser el tiempo de respuesta de los tubos solarímetros utilizados de 3 minutos, se programó el datalogger para realizar una medida cada 5 minutos, promediando los 6 valores correspondientes cada media hora.

### 3.5. Cálculo de transmisividad y comparación de resultados

La transmisividad global medida en las maquetas ( $\tau$ ) se calcula como el cociente entre los valores de radiación global medidos bajo la cubierta ( $I_i$ ) y los medidos en el exterior ( $I_o$ ) (Albright y col., 1985), a intervalos de 30 minutos.

$$\tau = \frac{I_i}{I_o}$$

Ecuación 14

Se compararon los valores registrados cada media hora por los tubos solarímetros con las medias medio-horarias de las salidas del modelo en días completamente soleados. También se llevaron a cabo comparaciones de las transmisividades medias ponderadas diarias ( $\tau_{MPD}$ ).

El valor de transmisividad media diaria es un valor más realista que el de los valores instantáneos para la estimación de la cantidad de radiación que llega al invernadero ya que en este valor se le da un mayor peso a la transmisividad en las horas centrales del día donde los valores radiativos son mayores, la relación entre radiación directa y difusa es más alta y las condiciones de condensación son menores.

Para su cálculo se utilizó la siguiente fórmula, teniendo en cuenta los valores medios-horarios:

$$\tau_{MPD} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i * (I_{o,i})}{\sum_{i=1}^n (I_{o,i})}$$

Ecuación 15

donde:

$\tau$  = transmisividad del material de cubierta

$I_o$  = radiación global medida en el exterior

tanto para los datos experimentales como para los simulados por el modelo.

Para analizar el grado de aproximación del modelo, se realizaron gráficas comparativas y

regresiones lineales entre valores medidos y simulados por el modelo de la transmisividad media ponderada diaria de todos los días despejados del ciclo, y se analizó la bondad de los ajustes.

Previamente se valoró la viabilidad de utilizar todos los valores registrados o utilizar únicamente los correspondientes a la segunda mitad del día en caso de producirse problemas de condensación en el interior del tubo de vidrio de los sensores. Este hecho ocurrió en la orientación 90º Oeste/Este, cuyas medidas se realizaron en Abril con temperaturas nocturnas aún muy frías.

Posteriormente, se calcularon los parámetros estadísticos MBD (Mean Bias Deviation) y RMSD (Root Mean Square Deviation) (Foyo-Moreno y col., 2000). El primero proporciona información sobre la existencia de tendencias sistemáticas en las diferencias entre los valores medidos y los estimados, y el segundo proporciona una medida de la dispersión de esas diferencias.

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tau_{sim,i} - \tau_{exp,i}}{\tau_{exp,i}}$$

Ecuación 16

$$RMBSD = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\tau_{sim,i} - \tau_{exp,i}}{\tau_{exp,i}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Ecuación 17

donde:

N = número de datos simulados o medidos

$\tau_{sim,i}$  = transmisividad media diaria simulada en el momento i

$\tau_{exp,i}$  = transmisividad media diaria medida en el momento i

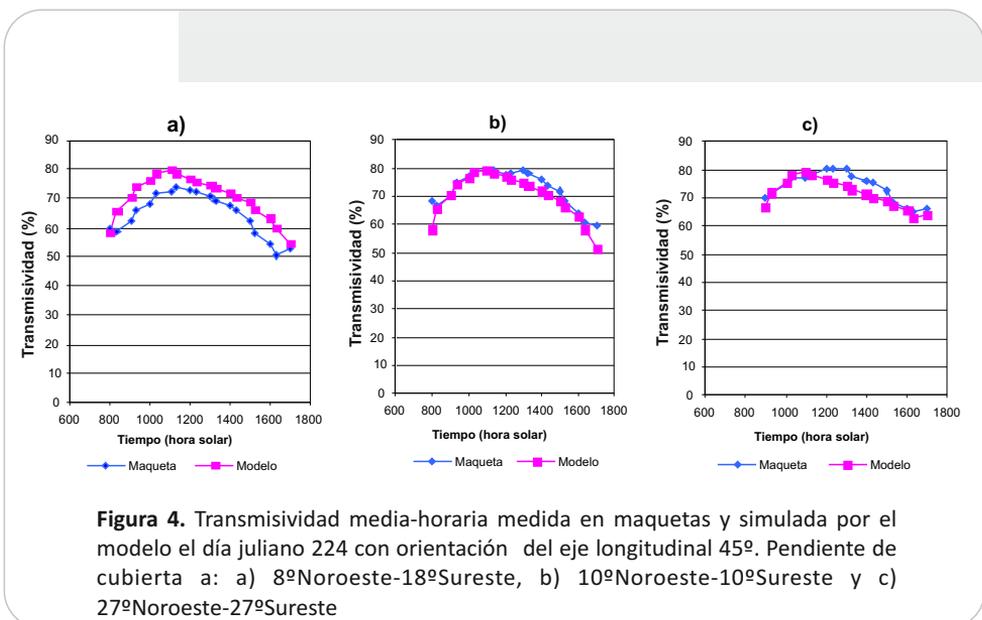
Para la comparación de las diferentes pendientes y orientaciones de las cubiertas de las tres maquetas estudiadas, se utilizó el promedio de la transmisividad media ponderada diaria de los ciclos soleados del periodo medido para cada orientación.

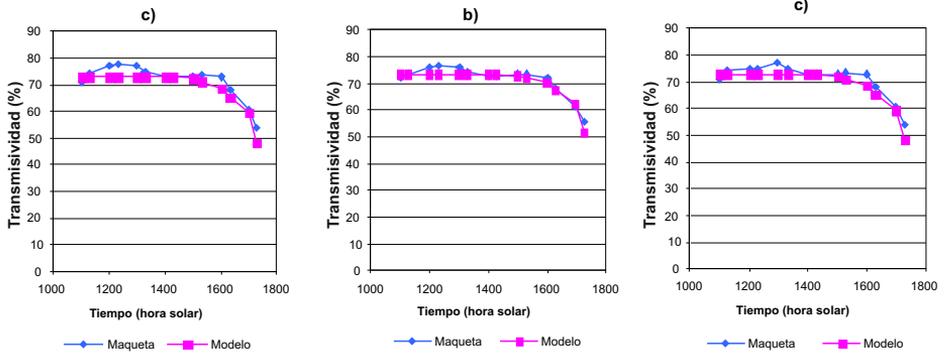
## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Validación del modelo

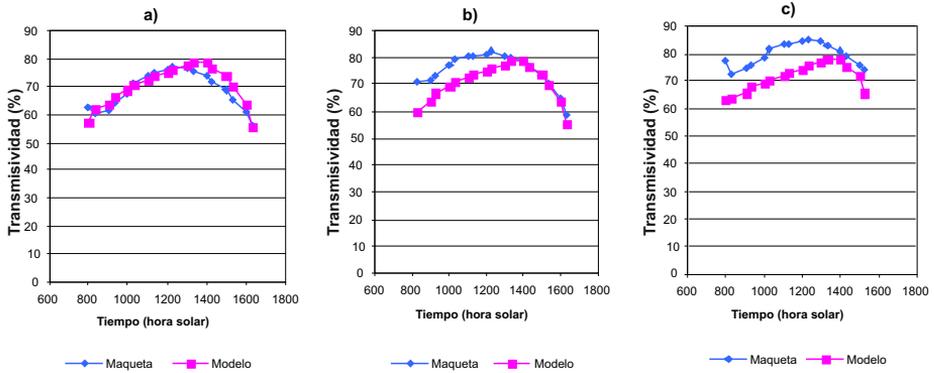
#### 4.1.1. Comparación gráfica de valores medio-horarios de transmisividad medidos y simulados

Las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 representan la evolución diaria de la transmisividad medio-horaria medida y simulada por el modelo TRADESMA, para las tres maquetas estudiadas (pendientes de cubierta: 8°-18°, 10°-10°, 27°-27°) en diferentes orientaciones del eje longitudinal en diversos días completamente soleados a lo largo del periodo de medida (días julianos 107, 220, 224, 238 y 254).

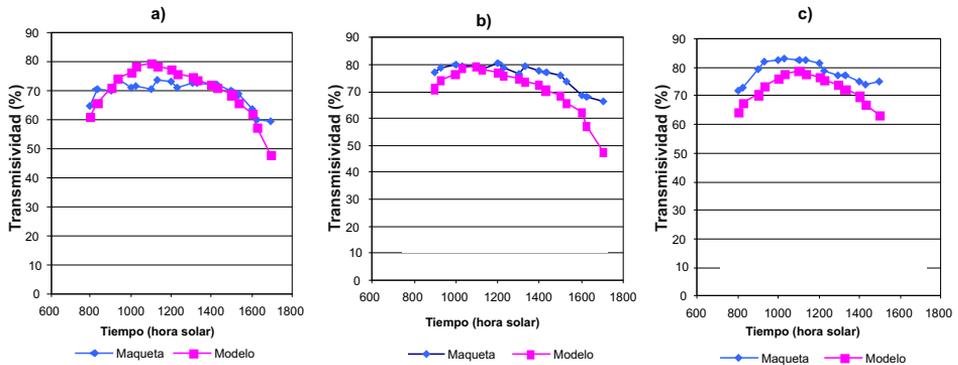




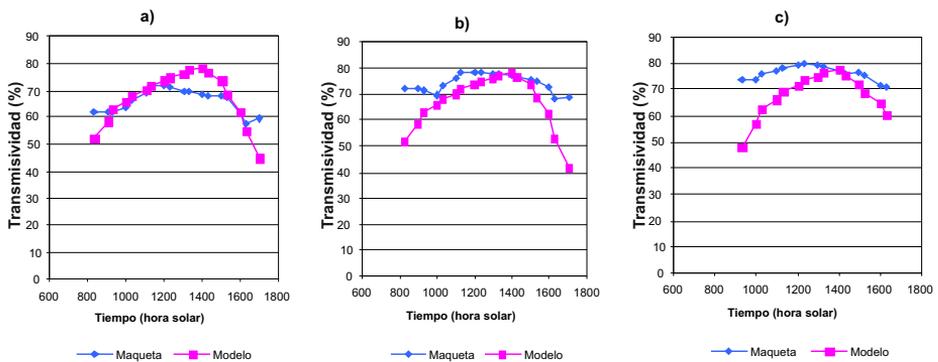
**Figura 5.** Transmisividad media-horaria medida en maquetas y simulada por el modelo el día juliano 107 con orientación del eje longitudinal  $90^\circ$ . Pendiente de la cubierta a: a)  $8^\circ$ Norte- $18^\circ$ Sur, b)  $10^\circ$ Norte- $10^\circ$ Sur y c)  $27^\circ$ Norte- $27^\circ$ Sur



**Figura 6.** Transmisividad media-horaria medida en maquetas y simulada por el modelo el día juliano 238 con orientación del eje longitudinal  $135^\circ$ . Pendiente de cubierta a: a)  $8^\circ$ Noreste- $18^\circ$ Suroeste, b)  $10^\circ$ Noreste- $10^\circ$ Suroeste y c)  $27^\circ$ Noreste- $27^\circ$ Suroeste



**Figura 7.** Transmisividad media-horaria medida en maquetas y simulada por el modelo el día juliano 220 con orientación del eje longitudinal 225°. Pendiente de cubierta a: a) 8°Suroeste-18°Noroeste, b) 10°Suroeste-10°Noroeste y c) 27°Suroeste-27°Noroeste



**Figura 8.** Transmisividad media-horaria medida en maquetas y simulada por el modelo el día juliano 254 con orientación del eje longitudinal 315°. Pendiente de cubierta a: a) 8°Suroeste-18°Noreste, b) 10°Suroeste-10°Noreste, y c) 27°Suroeste-27°Noreste

Aunque la tendencia de los valores simulados fue buena, en las comparaciones realizadas para la orientación  $45^\circ$  Suroeste/Noreste (figura 4), se pudo ver una sobreestimación de la transmisividad por parte del modelo para la pendiente  $8^\circ$ Noroeste- $18^\circ$ Sureste (figura 4a). Sin embargo, para las pendientes simétricas ( $10^\circ$ Noroeste- $10^\circ$ Sureste y  $27^\circ$ Noroeste- $27^\circ$ Sureste) se produjo una subestimación de la transmisividad por parte del modelo a partir del mediodía solar (figuras 4b y 4c).

Para la orientación  $90^\circ$  Oeste/Este (figura 5), en las primeras horas del día los valores medidos en las maquetas fueron inferiores a los reales, al ser la condensación en el interior del tubo solarímetro exterior a las maquetas superior a la producida en el interior de los tubos solarímetros ubicados bajo las mallas. Por ello, para la comparación de valores medidos y simulados sólo se consideró la transmisividad a partir de las 11:00 horas solares. Para la pendiente  $8^\circ$ Norte- $18^\circ$ Sur, el modelo subestimó las medidas realizadas en maquetas (figura 5a). Sin embargo, el ajuste entre maquetas y modelo para las pendientes simétricas  $10^\circ$ Norte- $10^\circ$ Sur y  $27^\circ$ Norte- $27^\circ$ Sur (figura 5b y 5c) fue bueno.

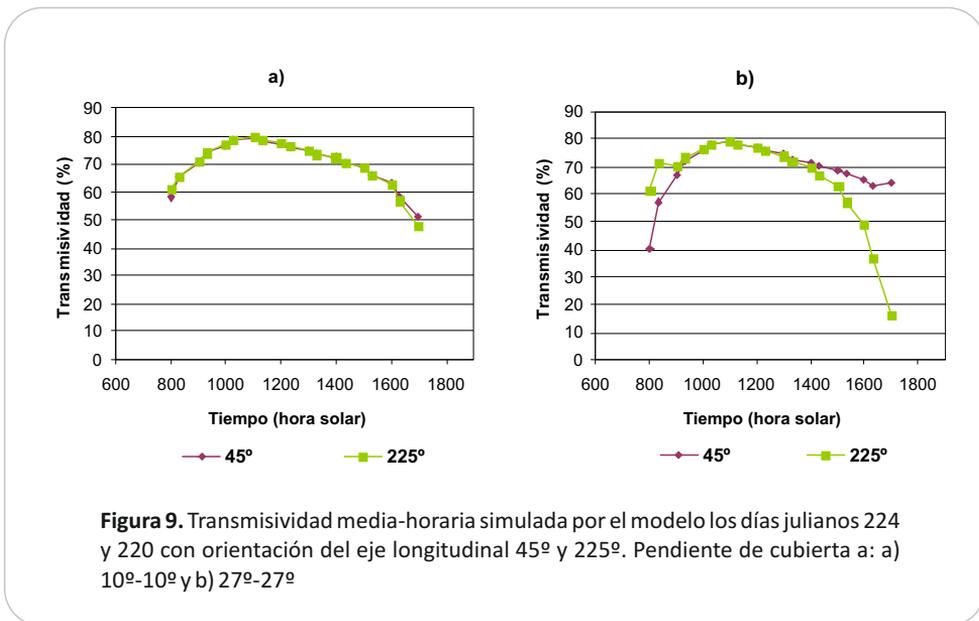
Para la orientación  $135^\circ$  Noroeste/Sureste (figura 6) los valores simulados por el modelo fueron similares a los medidos en la maqueta de pendiente  $8^\circ$ Noreste- $18^\circ$ Suroeste hasta las 13:00 hora solar. A partir de esta hora las transmisividades en la maqueta fueron inferiores a las simuladas por el modelo (figura 6a). Para la pendiente  $10^\circ$ Noreste- $10^\circ$ Suroeste, el modelo subestimó los valores de transmisividad hasta las 13:00 hora solar aproximadamente. En este caso, a partir de esta hora los valores fueron casi iguales para ambos (figura 6b). Para la pendiente simétrica más alta ( $27^\circ$ Noreste- $27^\circ$ Suroeste), el ajuste empeoró para todas las horas del día (figura 6c).

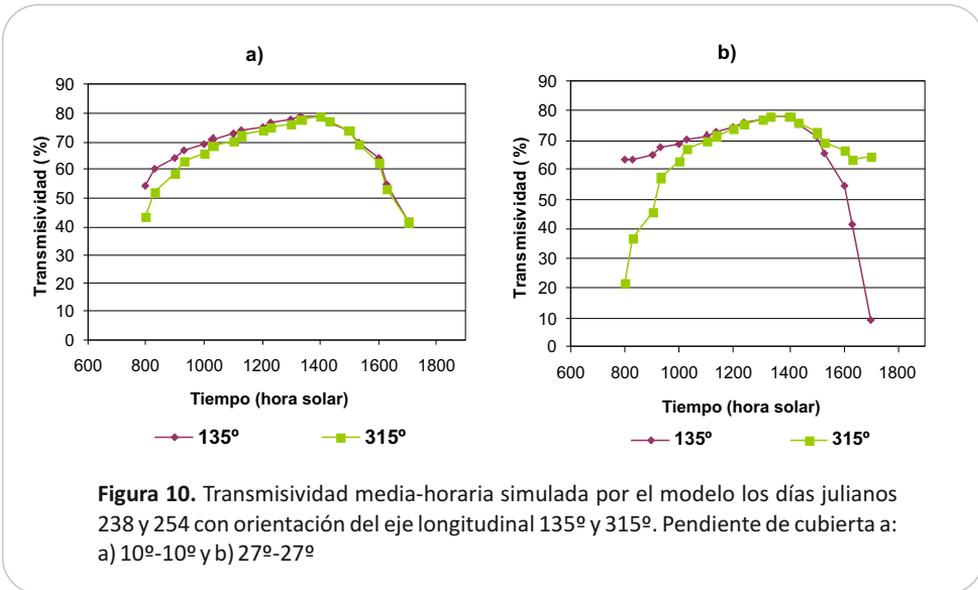
En la orientación  $225^\circ$  Noreste/Suroeste (figura 7), en la maqueta asimétrica  $8^\circ$ Noreste- $18^\circ$ Suroeste se observó una sobreestimación de la transmisividad por parte del modelo en las horas centrales del día (figura 7a). Sin embargo, en las maquetas simétricas se produjo una subestimación del modelo durante todo el día (figuras 7b y 7c).

Para la orientación  $315^\circ$  Sureste/Noroeste (figura 8), se produjo de nuevo una sobreestimación del modelo en la maqueta  $8^\circ$ Suroeste- $18^\circ$ Noreste (figura 8a) durante todo el día, con mayor diferencia respecto a las transmisividades medidas en la maqueta, a partir de las 12:00 horas solares. En cuanto a las maquetas simétricas, el modelo subestimó los valores de transmisividad durante todo el día, observándose una mayor diferencia durante las primeras y últimas horas del día.

Las medidas simuladas por el modelo para la orientación  $225^\circ$  Noreste/Suroeste deberán equivaler a las realizadas con la orientación  $45^\circ$  Suroeste/Noreste para los casos de cubierta simétrica (figuras 7b y 7c y figuras 4b y 4c). Este hecho se cumplió para la pendiente simétrica  $10^\circ$ - $10^\circ$  (figura 9a). Sin embargo, para la pendiente  $27^\circ$ - $27^\circ$ , en la orientación  $225^\circ$  la transmisividades estimadas por el modelo fueron similares a las estimadas para  $45^\circ$  entre las 9:00h y las 14:00h desviándose el resto del día (figura 9b).

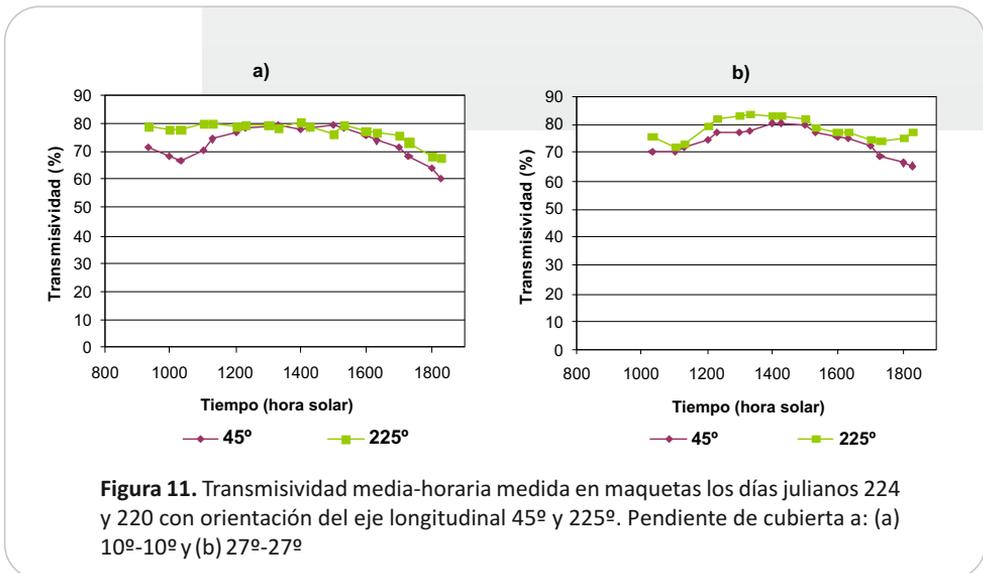
A su vez, la transmisividad estimada por el modelo para la orientación  $315^\circ$  Sureste/Noroeste en las maquetas simétricas (figura 8b y 8c) debería ser equivalente a la orientación  $135^\circ$  Noroeste/Sureste (figura 6b y 6c). Para la pendiente simétrica  $10^\circ$ - $10^\circ$  las transmisividades estimadas por el modelo para la orientación  $135^\circ$  fueron ligeramente superiores a las estimadas para  $315^\circ$  hasta mediodía solar, coincidiendo el resto del día (figura 10a). Sin embargo, el modelo de nuevo no estimó bien estas orientaciones para la pendiente simétrica  $27^\circ$ - $27^\circ$ , excepto en las horas centrales del día (figura 10b).

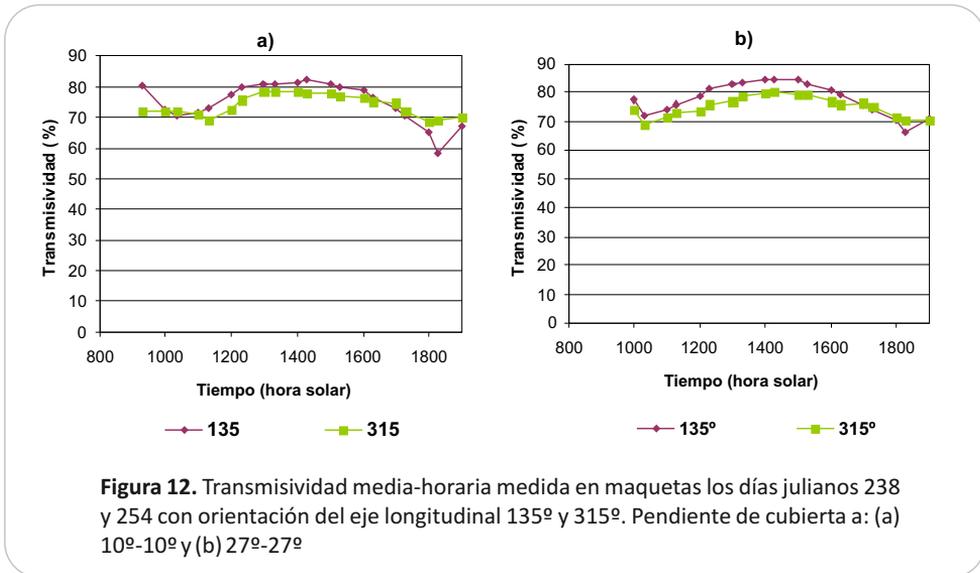




Si comparamos las transmisividades medidas en las maquetas para las orientaciones simétricas (45° y 225°) y (135° y 315°), sí observamos valores de transmisividad similares en todos los casos (figuras 11 y 12). Las diferencias que se aprecian se deben a la realización de las medidas en días julianos diferentes.

En las figuras 11 y 12, se observan valores de transmisividad de las maquetas anómalos en las primeras y últimas horas del día, debido a la entrada de radiación por los laterales de la maqueta. Diferencias similares han sido documentadas por Gueymard (1989), Heuvelink y col. (1995) y Soriano (2002), en los que se apreciaron valores superiores de transmisividad medidos a primeras y últimas horas del día.





#### 4.1.2. Cuantificación numérica del ajuste entre valores medio-horarios de transmisividad medidos y simulados

Para cuantificar estos ajustes de forma numérica se realizaron regresiones lineales entre los valores medio-horarios de transmisividad calculados por el modelo y los medidos en las maquetas. Las ecuaciones correspondientes y los coeficientes de determinación aparecen en la tabla 3.

La orientación 90° muestra un buen ajuste entre los valores medidos y los calculados en las tres pendientes cuya recta de regresión se aproxima a la ecuación de pendiente la unidad y término independiente cero. Además, los coeficientes de determinación en las pendientes simétricas son muy buenos ( $R^2 > 0,9$ ) y en la pendiente asimétrica es bueno ( $R^2 > 0,8$ ). Este resultado coincide con los valores obtenidos con el modelo TRADINMED para la orientación este-oeste (Soriano y col., 2004; Hernández, 2009).

En el resto de orientaciones los ajustes son peores, siendo las orientaciones 225° y 315° las que presentan mayor desviación del modelo.

**Tabla 3.** Ecuaciones y coeficientes de determinación de las regresiones entre los valores estimados por el modelo y los medidos en las maquetas en cinco días julianos soleados (107, 220, 224, 238 y 254) y cinco orientaciones del eje longitudinal de la maqueta (45° SO/NE, 90° O/E, 135° NO/SE, 225° NE/SO y 315° SE/NO)

Orientación maquetas	DJ	Regresiones y coeficientes de determinación		
		8°NO-18°SE	10°NO-10°SE	27°NO-27°SE
45°	224	Y = 0,9439 X + 9,2041 R <sup>2</sup> = 0,8645	Y = 1,1395 X - 12,7140 R <sup>2</sup> = 0,8807	Y = 0,8925 X + 5,5827 R <sup>2</sup> = 0,7937
		8°N-18°S	10°N-10°S	27°N-27°S
90°	107	Y = 1,0506 X - 7,7012 R <sup>2</sup> = 0,8728	Y = 1,0455 X - 4,0304 R <sup>2</sup> = 0,9390	Y = 1,0682 X - 7,0460 R <sup>2</sup> = 0,9179
		8°NE-18°SO	10°NE-10°SO	27°NE-27°SO
135°	238	Y = 1,0079 X + 0,6747 R <sup>2</sup> = 0,8508	Y = 0,8805 X + 4,4026 R <sup>2</sup> = 0,7178	Y = 0,9435 X - 3,7300 R <sup>2</sup> = 0,6164
		8°SE-18°NO	10°SE-10°NO	27°SE-27°NO
225°	220	Y = 1,700 X - 48,0470 R <sup>2</sup> = 0,7968	Y = 1,4378 X - 39,662 R <sup>2</sup> = 0,7494	Y = 1,1075 X - 14,6070 R <sup>2</sup> = 0,7903
		8°SO-18°NE	10°SO-10°NE	27°SO-27°NE
315°	254	Y = 1,8414 X - 54,571 R <sup>2</sup> = 0,7610	Y = 2,4535 X - 115,2500 R <sup>2</sup> = 0,7014	Y = 1,9180 X - 78,4140 R <sup>2</sup> = 0,4618

#### 4.1.3. Comparación de la transmisividad media ponderada diaria calculada a partir de los valores medidos y simulados

El valor de transmisividad media ponderada diaria es un valor más realista que el de los valores instantáneos para la estimación de la cantidad de radiación que va a llegar al invernadero.

En la tabla 4 se muestran las ecuaciones y los coeficientes de determinación de las regresiones entre los valores medidos en las maquetas y los simulados por el modelo de la transmisividad media ponderada diaria en días soleados para cada orientación.

**Tabla 4.** Ecuaciones y coeficientes de determinación de las regresiones entre los valores medidos en las maquetas y los simulados por el modelo de la transmisividad media diaria ponderada, para las distintas pendientes de cubierta y orientaciones estudiadas

Orientación maquetas	Orientación pendientes cubierta		
	8°NO-18°SE	10°NO-10°SE	27°NO-27°SE
45°	$Y = -8,3521X + 6,5979$ $R^2 = 0,6000$	$Y = -4,8539X + 4,1529$ $R^2 = 0,8485$	$Y = -7,7140X + 6,1265$ $R^2 = 0,9790$
	8°N-18°S	10°N-10°S	27°N-27°S
90°	$Y = 1,6355X - 0,5406$ $R^2 = 0,8655$	$Y = 1,3899X - 0,3717$ $R^2 = 0,8945$	$Y = 1,4601X - 0,4020$ $R^2 = 0,9017$
	8°NE-18°SO	10°NE-10°SO	27°NE-27°SO
135°	$Y = 4,6007X - 2,5788$ $R^2 = 0,9274$	$Y = -4,7482X + 4,0404$ $R^2 = 0,922$	$Y = -3,8245X + 3,3784$ $R^2 = 0,7134$
	8°SE-18°NO	10°SE-10°NO	27°SE-27°NO
225°	$Y = -2,3179X + 2,3139$ $R^2 = 0,6492$	$Y = -7,0631X + 5,7941$ $R^2 = 0,7946$	$Y = -4,5276X + 3,9134$ $R^2 = 0,8369$
	8°SO-18°NE	10°SO-10°NE	27°SO-27°NE
315°	$Y = -2,4707X + 2,3202$ $R^2 = 0,7178$	$Y = -3,2032X + 2,8939$ $R^2 = 0,8295$	$Y = -1,1654X + 1,4406$ $R^2 = 0,6074$

De nuevo, las regresiones presentadas muestran una mejor relación entre los valores medidos y los calculados para la orientación 90° para todas las pendientes, cuya recta de regresión se ajusta más a la ecuación de pendiente la unidad y término independiente cero, siendo además sus coeficientes de correlación superiores a 0,86. El resto de las regresiones no tienen valores aceptables. De nuevo, los resultados son similares a los obtenidos con el modelo TRADINMED para la orientación este-oeste (Soriano y col., 2004; Hernández, 2009).

Paralelamente, se han calculado los valores de la desviación media de los errores (MBD) y la raíz cuadrada de la desviación media (RMSD) (tabla 5). En líneas generales, existe una infravaloración del modelo respecto a la transmisividad medida en las maquetas, mostrada por los valores negativos de la MBD que oscila entre un 1% y un 31% aproximadamente, excepto para la pendiente 8°-18°. No obstante, una desviación menor de un 5% puede considerarse como satisfactoria ya que, además de los factores no incluidos en el modelo, los errores derivados de la

exactitud y precisión de los sensores, y de las condiciones de medición en campo aumentan también la dispersión de los datos (Hernández, 2009).

En este análisis las mayores desviaciones RMSD (entre 20% y 63%), corresponden a las maquetas simétricas orientadas a 135°, 225° y 315° y, en especial, a la maqueta de mayor pendiente, 27°-27°.

**Tabla 5.** MBD Y RMBD entre los valores estimados por el modelo y los medidos en las maquetas

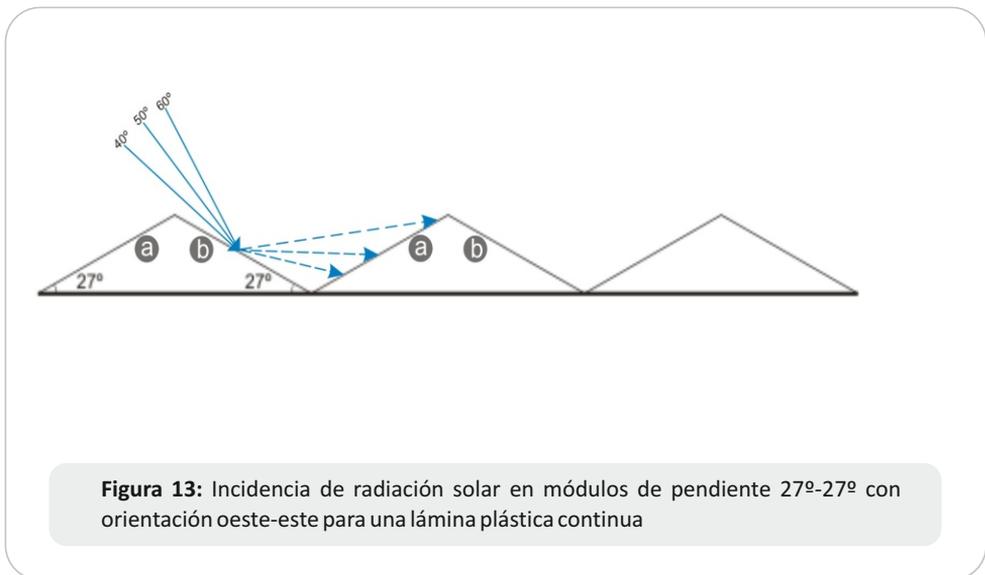
45°		<b>8°NO-18°SE</b>	<b>10°NO-10°SE</b>	<b>27°NO-27°SE</b>
	MBD (%)	7,91	-4,04	3,37
	RMBD (%)	8,93	6,37	4,65
90°		<b>8°N-18°S</b>	<b>10°N-10°S</b>	<b>27°N-27°S</b>
	MBD (%)	-5,81	-1,24	-3,38
	RMBD (%)	6,89	2,83	4,89
135°		<b>8°NE-18°SO</b>	<b>10°NE-10°SO</b>	<b>27°NE-27°SO</b>
	MBD (%)	1,58	-6,73	-16,62
	RMBD (%)	4,32	8,64	23,94
225°		<b>8°SE-18°NO</b>	<b>10°SE-10°NO</b>	<b>27°SE-27°NO</b>
	MBD (%)	0,04	-9,41	-8,70
	RMBD (%)	7,67	13,14	9,48
315°		<b>8°SO-18°NE</b>	<b>10°SO-10°NE</b>	<b>27°SO-27°NE</b>
	MBD (%)	0,38	-13,06	-31,22
	RMBD (%)	10,43	20,91	62,45

#### 4.1.4. Discusión de la validación del modelo TRADESMA de las maquetas estudiadas

Tanto en las figuras medio-horarias (figuras 4-8), como en las cuantificaciones numéricas de los ajustes entre valores medio-horarios (tabla 3) y los ajustes de la transmisividad media ponderada diaria (tabla 4), en ciertos periodos del día y de forma más destacada en las pendientes

simétricas, se observaba una subestimación del modelo frente a las medidas realizadas en maquetas. Las ecuaciones introducidas en el modelo TRADESMA para caracterizar la radiación solar incidente (interacción con el material de cubierta, elementos longitudinales y transversales) se consideran para un material con superficie continua.

En una lámina plástica continua, para una pendiente simétrica  $27^{\circ}$ - $27^{\circ}$ , durante las horas centrales del día y en época estival, parte de la radiación que entra en el lado b del primer módulo (figura 13), se reflejaría y entraría en el módulo siguiente. Esto ocurriría para ángulos de elevación solar entre  $40^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  aproximadamente. Parte de la radiación reflejada por el lado b entra por el lado a del siguiente módulo y volverá a salir por el lado b de este segundo módulo, atravesando un módulo más y así sucesivamente. Por tanto, a los rayos incidentes por el lado a de los módulos, se suman los procedentes de la reflexión del lado b del módulo anterior.



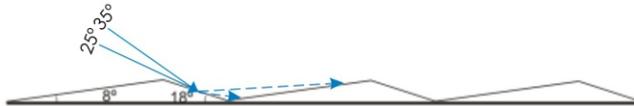
En invernaderos de alta pendiente, como ya indicó Schultz (1985, citado por Critten, 1993), se dan fenómenos de reflexión en el lado norte de la cubierta que también contribuyen a crear diferencias entre la transmisividad del módulo sur y la transmisividad del resto de los módulos. Según Soriano y col. (2004), en invernaderos de alta pendiente, existen periodos a lo largo del año en que la transmisividad del módulo sur es inferior a la de los otros módulos por efecto de las reflexiones. En definitiva y coincidiendo con Kurata (1990), en invernaderos de cubierta de material continuo, las reflexiones no pueden ser despreciadas en invernaderos de pendiente elevada.

En invernaderos con pendientes pequeñas, las reflexiones afectarán en menor medida.

Para la pendiente 10°-10° (figura 14) se producen reflexiones para ángulos de elevación solar entre 10° y 25° aproximadamente y para pendientes 8°-18° (figura 15), entre 18° y 35°, aproximadamente, pero la intercepción con el módulo siguiente es menor en ambos casos que para la pendiente más alta (27°-27°), al ser la diferencia de cota entre cumbrera y canal mucho menor que en la maqueta 27°-27°. Además, en la maqueta asimétrica 8°-18° la longitud del lado b es mucho menor, por lo que las reflexiones en esta maqueta son menores que en el resto.



**Figura 14.** Incidencia de radiación solar en módulos de pendiente 10°-10° con orientación oeste-este para una lámina plástica continua



**Figura 15.** Incidencia de radiación solar en módulos de pendiente 8°-18° con orientación oeste-este para una lámina plástica continua

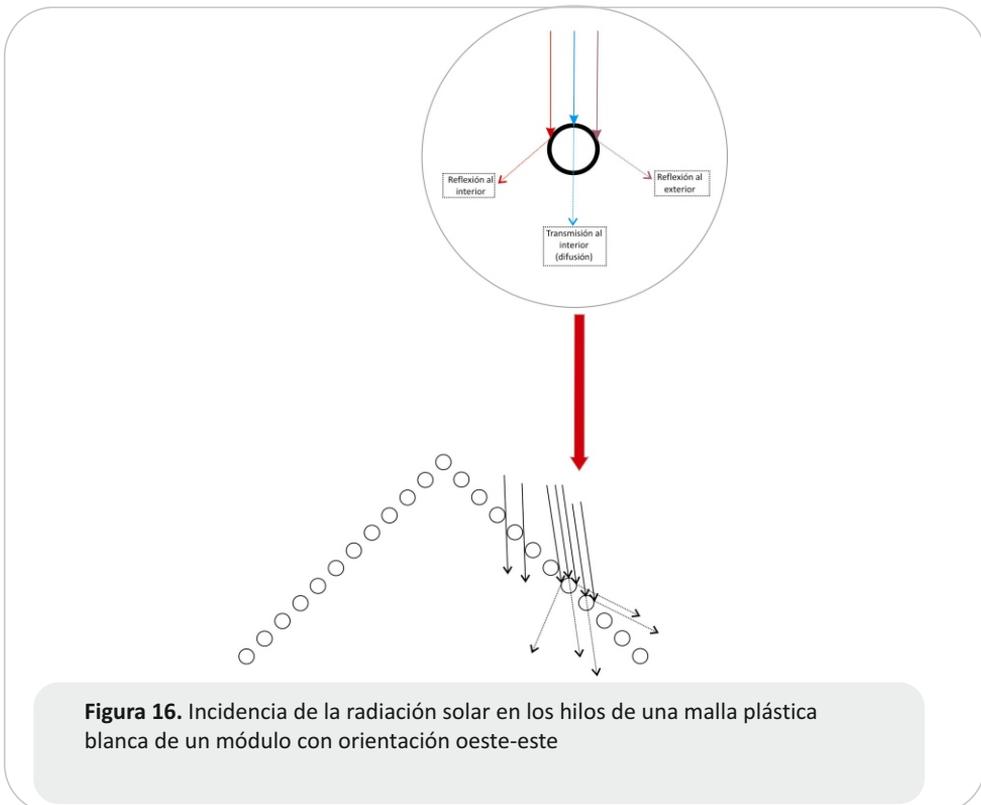
270 Sin embargo, el material de cubierta evaluado en este estudio es una malla, empleada para estructuras de sombreado y como tal, tiene una estructura regular con orificios cuadrados. La malla se caracteriza por la porosidad que viene determinada por el grosor del hilo y sus características físicas, así como por la densidad de la malla (número de hilos por centímetro). La sección circular de los hilos, hace que parte de la radiación los atraviese si se tratase de una malla blanca con hilos translúcidos, una pequeña parte de la radiación se reflejaría al exterior, otra al interior y otra parte pasaría a través de los huecos que hay entre los hilos (figura 16).

En el detalle de la figura 16, observamos que, de la radiación solar que llega a los hilos, una mínima parte se reflejará y la mayor proporción de la misma se transmitirá a través de los hilos hacia el interior de la malla con un importante efecto de difusión, como se ha visto en el capítulo anterior.

Una posible explicación sería que la suma de la cantidad de radiación que atraviesa los huecos más la que pasa por los hilos, permite registrar valores de radiación bajo la estructura de malla superiores a los de un material liso (plástico o vidrio) y, por tanto, la transmisividad obtenida es mayor. De ahí que la transmisividad medida en maquetas sea superior a la simulada por el modelo en la mayoría de los casos.

Si el estudio se realiza sobre mallas no traslúcidas (mallas negras) el efecto cambiaría, pues en este caso los hilos son opacos y no dejan pasar la radiación solar a través de ellos, absorbiendo todas las longitudes de onda y, por tanto, su poder de transmisión y difusión de radiación y de reflexión de la misma sería mínimo o nulo. Desmarais y col. (1999) concluyeron que el tamaño del hueco y el color de las mallas afectan principalmente a la transmisividad de este material.

Sería necesario, por tanto, un modelo más complejo para la caracterización transmisiva a radiación solar en mallas. El modelo debería considerar la radiación que atraviesa los huecos y la radiación que choca a través de la sección circular de los hilos. Además, deberían desarrollarse modelos diferentes para mallas opacas y traslúcidas.



**Figura 16.** Incidencia de la radiación solar en los hilos de una malla plástica blanca de un módulo con orientación oeste-este

## 4.2. Comparación de la transmisividad a radiación global para las pendientes y orientaciones de cubierta estudiadas

En la tabla 6 se muestran los valores promedios de la transmisividad media ponderada diaria de las maquetas en el ciclo estudiado para cada orientación. Las pendientes más bajas adquieren valores de transmisividad menores que la 27<sup>º</sup>-27<sup>º</sup>, por tanto, para cultivos de ciclo primavera-verano con meses de máxima radiación, los invernaderos de malla con baja pendiente serán los más adecuados.

Los valores de transmisividad media ponderada diaria son similares para las tres pendientes de cubierta en la orientación 90<sup>º</sup> (diferencias menores al 1%). Para el resto de orientaciones hay diferencias de transmisividad entre las maquetas de baja pendiente y la de mayor pendiente, de hasta un 9% aproximadamente en las orientaciones 135<sup>º</sup>, 225<sup>º</sup> y 315<sup>º</sup>.

En la comparación entre orientaciones no se observa una tendencia clara o destacada de mejora de transmisividad para ninguna de las tres pendientes estudiadas, al contrario de lo registrado en ciclos de invierno en diversos estudios, que han comprobado la optimización conseguida con la orientación este-oeste para cubiertas continuas respecto a las demás en nuestra latitud, en vidrio y plástico, (Jaffrin y Urban, 1990; Kurata, 1990; Pieters, 1994, para radiación PAR; Papadopoulus y Pararajasingham, 1997; Papadakis y col., 1998; Soriano y col., 2004; Hernández, 2009).

Los mayores valores de transmisividad media ponderada diaria se consiguieron para la maqueta simétrica 27<sup>º</sup>-27<sup>º</sup> para todas las orientaciones. Esto se debe a una mayor incidencia de la radiación a través de los huecos, desde primera a última hora del día, sin embargo, para pendientes más bajas la radiación solo incidiría por los huecos en las horas centrales del día (figura 17).

Estudios realizados con cubiertas de plástico, indican mayores transmisividades con altas pendientes. Así, Nisen (1969) citado por Elser y col. (2002), al analizar la transmisividad de varios tipos de invernaderos bajo diferentes orientaciones (N-S y E-O), concluyó que la transmisividad aumenta al incrementar la inclinación de la cubierta en estructuras a dos aguas. Soriano y col. (2004) estudiaron para una latitud de 37<sup>º</sup>N varias combinaciones de pendientes de cubierta de plástico, usando para ello modelos a escala y de simulación numérica. El estudio concluyó que el incremento de la inclinación de la cubierta mejoraba la transmisividad del invernadero. Además y coincidiendo con nuestro estudio, indicaron que los modelos asimétricos no mejoraban sustancialmente la transmisividad con respecto a los simétricos de alta pendiente.

**Tabla 6.** Promedio de la transmisividad media ponderada diaria de las maquetas del ciclo estudiado para cada orientación

Orientación maquetas	Orientación pendientes cubierta		
	8°NO-18°SE	10°NO-10°SE	27°NO-27°SE
45°	0,6396	0,6871	0,6939
	0,6713	0,6657	0,6772
90°	0,6509	0,6885	0,7422
	0,6535	0,6242	0,7148
135°	0,6349	0,7192	0,7210
225°			
315°			

## 4. Conclusiones

- El modelo TRADESMA resulta de gran utilidad para predecir valores de transmisividad medio-horarios en la orientación de cubierta de 90° (O/E), al igual que ocurría con el modelo TRADINMED. Sin embargo, la validación para otras orientaciones no presentan ajustes válidos.

- El modelo TRADESMA está diseñado para láminas continuas y, sin embargo, en cubiertas de malla, de la radiación solar que llega a los hilos, una mínima parte se refleja y la mayor proporción de la misma se transmite a través de los hilos hacia el interior de la malla con un importante efecto de difusión. Se debería desarrollar un modelo más complejo para la caracterización transmisiva a radiación solar en mallas, considerando orientaciones diferentes de 90° (O/E), la radiación que atraviesa los huecos y la radiación que choca a través de la sección circular de los hilos. Se necesitarían modelos diferentes para mallas opacas y traslúcidas.

- Las pendientes menores adquieren valores de transmisividad inferiores, por tanto, para cultivos de ciclo primavera-verano con meses de máxima radiación, los invernaderos de malla con baja pendiente serían los más adecuados.

- Entre orientaciones no se ha observado una tendencia clara o destacada de mejora de transmisividad para ninguna de las tres pendientes estudiadas en las maquetas.

## 6. Bibliografía

Albright, L.D., Seginer, I., Marsh, L.S., Oko, A. 1985. In situ thermal calibration of unventilated greenhouses. *Journal agricultural Engineer Research* 31: 265-281.

Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Tesis doctoral. 240 pp.

Boulard, T. Alamrani, M. Roy, J.C. Jaffrin, A. Bouirden, L. 1998. Natural ventilation by thermal effect in a one-half scale model mono-spans greenhouse.. *Transactions of ASAE* 41 (3): 773-781.

Castilla, N. and López-Gálvez, J. 1994. Vegetable crop responses in improved low cost plastic greenhouses. *Journal of Horticultural Science* 69 (5): 915-921.

Challa, H. 2001. Modelling for present production problems in greenhouse horticulture in mild winter climates. *Acta Horticulturae* 559: 431-440.

Cockshull, K.E. 1989. The influence of energy conservation on crop productivity. *Acta Horticulturae* 245:530-536.

Critten, D.L. 1993. A review of the light transmission into greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 328: 9-31.

Desmarais, G., Ratti, C., Raghavan, S.V. 1999. Heat transfer modelling of screenhouses. *Solar Energy* 65: 271-284.

Elsner, B., Von Briassoulis, P., Waaitenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, Chr., Grataud, J. Russo, G., Suay-Cortés, R. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries: Part I: Design requirements. *Journal Agricultural Engineering Research* 75: 1-16.

Foyo-Moreno, I. Vida, J. Olmo, F.J. Alados-Arboledas, L. 2000. Estimating solar ultraviolet irradiance (290-385 nm) by means of spectral parametric models: SPCTRAL2 and SMARTS2. *Ann. Geophysicae* 18: 1382-1389.

González-Real, M.M., López, J.C., Cabrera. K-. Baille. A., Pérez-Parra, J. 2003. Variabilidad espacial de la radiación solar en invernadero parral. Medidas y modelo. *Actas II Congreso Nacional de Agroingeniería*: 239-240.

Hernández, G. 2009. Valoración radiativa, microclimática y productiva de dos invernaderos con diferente geometría de cubierta (hemicircular y lineal simétrica a dos aguas). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Almería. 258 pp.

Heuvelink, E., Batta, L.G.G., Damen, T.H.J. 1995. Transmission of solar radiation by a multispan Venlo-type glasshouse: validation of a model. *Agricultural and Forest Meteorology* 74: 41-59.

Jaffrin, A. and Urban, L. 1990. Optimisation of light transmission in modern greenhouses. *Acta Horticulturae* 281: 25-33.

Jiménez-Hornero, F.J., Gutiérrez, E., Hidalgo, R., Giraldez, J.V. 2005. Numerical study of the natural airflow in greenhouses using a two-dimensional lattice model. *Biosystems Engineering* 91(2): 219-228.

Jiménez-Hornero, J.E., Jiménez-Hornero, F.J., Giraldez, J.V. 2006. A linux cluster of personal computers for the numerical simulation of natural airflows in greenhouses using a lattice model. *Computers and Electronics in Agriculture* 52: 79-89.

Kurata, K. 1990. Role of reflection in light transmissivity of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 52: 319-331.

Kurata, K. 1995. Recalculation of optimal shapes of east-west oriented tunnels with respect to direct solar radiation transmissivity. *Acta Horticulturae* 399: 113-120.

Li, S. Kurata, K. Takakura, T. 1995. Solar radiation transmissivity into a lean-to greenhouse. *Acta Horticulturae* 399: 127-134.

Moller, M., Tanny, J., Li, Y., Cohen, S.T. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 35-51.

Montero, J.I. Antón, A. Hernández, J. Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Horticulturae* 559: 203-209.

Montero, J.I. and Antón, A. 2003. Tomato response to a high light transmission film used as a covering material for greenhouses. *Acta Horticulturae* 614: 401-405.

Oca, J. Montero, J.I. Antón, A. Crespo, D. 1999. A method for studying natural ventilation by thermal effects in a tunnel greenhouse using laboratory-scale-models. *Journal of Agricultural engineering Research* 72: 93-104.

Papadakis, G., Manolakis, D., Kyritsis, S., 1998. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale models. *Journal Agricultural Engineering Research* 71: 331-338.

Pieters, J. G. 1994. Condensation and PAR transmittance of greenhouses. *Plasticulture* 112: 23-31.

Papadopoulos, A.P. and Pararajasingham, S. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicum esculentum* mill.). *Scientia Horticulturae* 69: 1-29.

Papadakis, G. Manolakos, D. Kyritsis, S. 1998. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale models. *Journal Agricultural Engineering Research* 71: 331-338.

Pollet, I.V. and Pieters, J.G. 2002. PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 285-298.

Soriano, T. 2002. Validación de un modelo de cálculo de transmisividad a radiación solar directa en invernadero mediante maquetas a escala. Determinación del prototipo óptimo para la costa mediterránea. Tesis doctoral. Universidad de Almería. 274 pp.

Soriano, T., Montero, J.I., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Antón, A., Hernández, J., Morales, M.I., Castilla, N. 2004. A study of direct solar radiation transmission in assymetrical multispan greenhouse usin sacle models and simulation models. *Biosystems engineering* 88(2): 243-253.

Swinkels, G.L.A.M., Sonneveld, P.J., Bot, G.P.A. 2001. Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through Zigzag covering material. *Journal Agricultural Engineering Research* 79(1): 91-97.

Vougioukas, S.G. and Sapouna, A.A. 2005. Greenhouse transmissivity computations based on a global radiation transfer model. *Acta Horticulturae* 691: 741-747.

Wang, S. and Boulard, T. 2000. Measurement and modelling of radiative heterogeneity in a greenhouse tunnel. *Acta Horticulturae* 534: 139-145.

Zabeltitz, Chr. Von. 1998. Greenhouse structures. Chapter 2 of *Ecosystems of the world* 20. Greenhouse ecosystems. Editor David Gooddall. Cowan University, Joondalup, W.A. (Australia).



