UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL

TESIS DOCTORAL

MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y TÉCNICAS DE CONTROL DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

ANA RODRÍGUEZ DÍAZ
Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2009

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y TÉCNICAS DE CONTROL DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

Autora: ANA RODRÍGUEZ DÍAZ
Ingeniero Agrónomo

Directores: D. SATURNINO DE LA PLAZA PÉREZ
Dr. Ingeniero Agrónomo
Dª. ROSA MARÍA BENAVENTE LEÓN
Dra. Ingeniero Agrónomo

Madrid, 2009

“Parecería que la razón humana debe construir en primer lugar las formas, antes de poderlas comprobar en las cosas…el saber no puede surgir de la mera experimentación sino que sólo surge de la comparación entre lo ideado y lo observado.”

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Una vez finalizada esta tesis, llega el momento de escribir esta página, la última pero no por ello la menos importante. El doctorado ha significado una dedicación intensa al estudio y a la experimentación, con momentos muy duros y otros más gratificantes; pero es en esta recta final cuando he recibido la satisfacción del trabajo realizado.

Ha sido un periodo muy provechoso y, gracias a la beca FPI de la Comunidad de Madrid, he tenido la oportunidad de trabajar en el Departamento de Ingeniería Rural de la E.T.S.I. Agrónomos (UPM), con un equipo de personas digno de destacar, tanto por su calidad profesional como personal.

En primer lugar tengo que agradecer a mis tutores, Saturnino de la Plaza y Rosa María Benavente, el que me hayan dirigido esta tesis compartiendo toda su experiencia profesional, dándome ánimos y apoyo en todo momento. Sin ellos, este trabajo no hubiera dado sus frutos.

Quiero expresar mi agradecimiento a Jose Luis García, que me ha dado siempre su apoyo así como el ánimo para que una vez fuera de la Escuela, hiciera el esfuerzo de terminar la tesis y continuar mi vinculación con el mundo universitario. Siempre ha estado atento a la evolución de esta tesis, aportando su saber como experto en la climatización de invernaderos.

A todo el Departamento de Electrotecnia y de Producción Vegetal por haberme permitido hacer los experimentos en sus instalaciones, a veces haciéndole verdaderas "perrerías" a las gerberas. Gracias a todos los profesores de los cursos de Doctorado, por haberme ayudado a profundizar en el mundo de los invernaderos, y haber hecho de esos primeros años de doctorado una motivación para seguir adelante.

Por último a mi familia y sobre todo a mi marido, por estar ahí en todo momento, por animarme en los momentos más difíciles, porque sé que comparten conmigo la ilusión de haber finalizado esta etapa y porque han contribuido a que el esfuerzo haya merecido la pena.

INDICE

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE.....I

ÍNDICE DE FIGURAS.....IV

ÍNDICE DE TABLAS.....X

RESUMEN……2

SUMMARY……6

1. INTRODUCCIÓN 10

1.1. ASPECTOS GENERALES 10

1.2. PRINCIPALES ZONAS DE PRODUCCIÓN EN INVERNADERO EN EL MUNDO.....11

1.2.1. HISTORIA 11

1.2.2. ZONAS MUNDIALES DE PRODUCCIÓN 14

1.2.3. LA EXPLOTACIÓN HORTÍCOLA DE INVERNADEROS EN ESPAÑA 16

1.2.4. PERSPECTIVAS FUTURAS 18

1.3. ELECCIÓN DEL INVERNADERO 19

1.3.1. ESPECIES VEGETALES 19

1.3.2. FORMA Y ORIENTACIÓN DEL INVERNADERO 20

1.3.3. ESTRUCTURA DEL INVERNADERO 21

1.3.4. MATERIALES DE CUBIERTA.....22

1.3.5. EQUIPAMIENTO DEL INVERNADERO.....25

1.4. VARIABLES CLIMÁTICAS A CONTROLAR 26

1.4.1. TEMPERATURA.....27

1.4.2. HUMEDAD RELATIVA.....28

1.4.3. ILUMINACIÓN 31

1.4.4. CO_2 33

INDICE

1.5. VENTILACIÓN EN INVERNADEROS....345

1.6. CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS DURANTE PERIODOS FRÍOS....40

1.6.1. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN....41

1.7. EMPLEO DE PANTALLAS TÉRMICAS....48

1.8. AUTOMATIZACIÓN DE INVERNADEROS....50

1.9. INSTALACIONES ELÉCTRICAS....53

1.10. INSTRUMENTACIÓN Y SENSORES....54

1.11. COSTES E INGRESOS DE CULTIVO EN INVERNADEROS....54

2. OBJETIVOS....60

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA....62

3.1. CALEFACCIÓN EN INVERNADEROS....62

3.2. VENTILACIÓN EN INVERNADEROS....74

3.3. HUMEDAD Y CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS....91

3.4. CONTROL CLIMÁTICO EN INVERNADEROS. MODELOS....98

3.5. MODELADO DEL CLIMA INTERIOR DEL INVERNADERO MEDIANTE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)....117

4. MATERIALES Y MÉTODOS....128

4.1. EL INVERNADERO EXPERIMENTAL....128

4.2. ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN EXPERIMENTALES....141

4.2.1 ESTUDIOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y ESTRATEGIAS CON AEROTERMOS....141

4.2.2. ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS....143

5. RESULTADOS....154

5.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CONDENSACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y CON AEROTERMOS....154

5.2. OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS....156

5.2.1. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN....156

5.2.2. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN....167

5.3. VALIDACIÓN DEL MODELO....183

5.3.1. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN....183

5.3.2. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE....187

6. CONCLUSIONES 192

7. PROPUESTAS DE TRABAJOS POSTERIORES 195

8. BIBLIOGRAFÍA 197

INDICE DE FIGURAS

1. INTRODUCCIÓN 10

1.2. PRINCIPALES ZONAS DE PRODUCCIÓN EN INVERNADERO EN EL MUNDO 11

1.2.3. LA EXPLOTACIÓN HORTÍCOLA DE INVERNADEROS EN ESPAÑA 16

Figura. 1.1. Tipos de invernadero parral en Almería y distribución de cultivos en suelo y en sustrato. Elaboración propia a partir de datos obtenidos en Castilla, 2007. 17

1.4. VARIABLES CLIMÁTICAS A CONTROLAR 26

1.4.3. ILUMINACIÓN 31

Figura 1.2. Invernadero dotado con acolchado blanco sobre el suelo para mejorar la iluminación natural. 31

Figura 1.3. Invernadero dotado con encalado y blanqueo de cubierta para reducir la cantidad de radiación que llega al invernadero. 32

Figura 1.4. Invernadero dotado con pantalla térmica para reducir la cantidad de radiación que llega al invernadero. 32

1.4.4. CO_2 33

Figura 1.5. Efecto de la temperatura sobre la asimilación de dióxido de carbono del cultivo. 34

Figura 1.6. Concentración de CO_2 en el interior del invernadero en función del periodo del día y en función del Índice de Área Foliar del cultivo. 34

1.6. CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS DURANTE PERIODOS FRÍOS..... 40

1.6.1. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN 41

Figura 1.7. Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Aerotermos. 43

Figura 1.8. Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Generador de aire caliente. 43

Figura 1.9. Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Generador de aire caliente con conexión de tubos de polietileno. 43

Figura 1.10. Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Distintas disposiciones del generador de aire caliente. 44

Figura 1.11. Caldera en la que se produce el agua caliente que se distribuye por las tuberías de plástico o metálicas que recorren la superficie del invernadero para su calefacción. 44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.12. Sistema de calefacción por agua caliente a alta temperatura mediante tuberías metálicas. 45

Figura 1.13. Sistema de calefacción por agua caliente a baja temperatura mediante tuberías de plástico. 45

1.11. COSTES E INGRESOS DE CULTIVO EN INVERNADEROS 54

Figura 1.14. Invernadero multicapilla de cristal tipo Venlo típico del agrosistema holandés o nórdico. 56

Figura 1.15. Invernadero multitúnel de plástico flexible típico del agrosistema mediterráneo. 57

4. MATERIALES Y MÉTODOS 128

4.1. EL INVERNADERO EXPERIMENTAL 128

Figura 4.1. Vista exterior de los dos módulos que constituyen el invernadero experimental. Los experimentos se llevaron a cabo en el módulo de la derecha.. 129

Figura 4.2. Alzado y planta de la configuración del invernadero experimental.. 130

Figura 4.3. Ventana cenital del invernadero. 131

Figura 4.4. Ventana lateral del invernadero. 131

Figura 4.5. Malla de sombreo y ahorro energético del invernadero durante la extensión. 132

Figura 4.6. Vista del invernadero con la pantalla térmica extendida. 132

Figura 4.7. Vista del invernadero con la pantalla térmica extendida y las ventanas cenital y lateral abiertas. 133

Figura 4.8. Esquema de la disposición de los elementos del suelo radiante, formado por una red de tubos de polietileno reticulado en una capa de mortero. El diseño incluye, sobre el suelo del invernadero, una capa de aislante térmico (poliestireno expandido), una barrera antivapor (lámina de polietileno) y un mallazo metálico para guiar los tubos. 134

Figura 4.9. Vista del montaje del suelo radiante en el invernadero objeto de los experimentos. 134

Figura 4.10. Caldera eléctrica utilizada para calentar el agua que circula por las tuberías que constituyen el sistema de calefacción por suelo radiante. 135

Figura 4.11. Generadores eléctricos de aire caliente o aerotermos. 135

INDICE DE FIGURAS

Figura 4.12. Cuadro eléctrico con las conexiones eléctricas y automatismos utilizados para accionar ventanas, pantalla térmica y sistemas de calefacción. .. 136

Figura 4.13. Esquema de la planta del invernadero y disposición de los distintos sistemas de calefacción utilizados en los experimentos. 140

5. RESULTADOS..... 154

5.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CONDENSACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y CON AEROTERMOS 154

Figura 5.1. Gráfica comparativa de la temperatura media interior del invernadero medida a 1.5 m (ºC) a lo largo de un día medio para las estrategias de calefacción 1 y 3. 155

Figura 5.2. Gráfica comparativa de la condensación (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para las estrategias de calefacción 1 y 3. 156

5.2. OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS 156

5.2.1. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN..... 156

Figura 5.3. Humedad relativa en el interior del invernadero (%) en función de la temperatura interior del invernadero medida a 1.5 m (ºC) cuando no existe condensación y cuando se produce condensación para el conjunto de datos en los que el invernadero no utilizaba calefacción por suelo radiante. Datos registrados cada 5 minutos. 157

Figura 5.4. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación C en situación del invernadero sin calefacción. 162

Figura 5.5. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación D en situación del invernadero sin calefacción. 162

Figura 5.6. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación H en situación del invernadero sin calefacción. 163

Figura 5.7. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación I en situación del invernadero sin calefacción. 163

INDICE DE FIGURAS

5.2.2. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN 167

Figura 5.8. Humedad relativa en el interior del invernadero (%), medida a 0.5 m en función de la temperatura interior del invernadero medida a 1.5 m (ºC) cuando no existe condensación y cuando se produce condensación para el conjunto de datos en los que el invernadero estaba dotado de calefacción por suelo radiante. Datos registrados cada 5 minutos. 167

Figura 5.9. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 170

Figura 5.10. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación F en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 171

Figura 5.11. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación G en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante..... 171

Figura 5.12. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la Combinación I en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 172

Figura 5.13. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Sin ventilación nocturna. 176

Figura 5.14. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (8 cm). 176

Figura 5.15. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (25 cm). 177

Figura 5.16. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna, sin ventilación nocturna. 177

Figura 5.17. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (8 cm). 178

Figura 5.18. Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (25 cm). 178

Figura 5.19. Gráfica comparativa de la temperatura del invernadero, ºC, a lo largo del día medio, para la estrategia 6 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y pantalla térmica y la estrategia 3 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y sin pantalla térmica, medida a 1.5 m de altura. 181

Figura 5.20. Gráfica comparativa de la temperatura del invernadero, ºC, a lo largo del día medio, para la estrategia 6 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y pantalla térmica y la estrategia 3 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y sin pantalla térmica, medida a 3.2 m de altura. 182

5.3. VALIDACIÓN DEL MODELO 183

5.3.1. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN 183

Figura 5.21. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación C en situación del invernadero sin calefacción. 184

Figura 5.22. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación H en situación del invernadero sin calefacción. 185

INDICE DE FIGURAS

5.3.2. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE 187

Figura 5.23. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 187

Figura 5.24. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación F en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 188

Figura 5.25. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación G en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 189

Figura 5.26. Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real y simulada por el modelo (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación I en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante. 189

INDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN 10

1.1. ASPECTOS GENERALES 10

1.2. PRINCIPALES ZONAS DE PRODUCCIÓN EN INVERNADERO EN EL MUNDO 11

1.2.2. ZONAS MUNDIALES DE PRODUCCIÓN 14

Tabla 1.1. Superficies estimadas (en miles de ha) de cultivo protegido en el mundo en el año 2006. El apartado de invernaderos incluye los túneles altos. 15

Tabla 1.2. Distribución global de invernaderos y túneles bajos en el Mediterráneo en el año 2006. 15

1.3. ELECCIÓN DEL INVERNADERO 19

1.3.4. MATERIALES DE CUBIERTA 22

Tabla 1.3. Duración de plásticos normalizados para invernaderos 24

Tabla 1.4. Características comparadas de los principales materiales plásticos utilizados en cubierta de invernadero 25

1.4. VARIABLES CLIMÁTICAS A CONTROLAR 26

1.4.1. TEMPERATURA 27

Tabla 1.5. Niveles térmicos óptimos del aire y del sustrato en diversos cultivos hortícolas. 28

1.11. COSTES E INGRESOS DE CULTIVO EN INVERNADEROS 54

Tabla 1.6. Costes medios de construcción y equipamiento de invernaderos mediterráneos dotados de ventilación lateral y cenital motorizadas, en el sur de España (sin incluir impuestos) incluyendo el montaje de lámina plástica (año 2007). Valores calculados para una superficie mínima de 1 ha. No incluye costes de ordenador de control climático y fertirrigación. 57

4. MATERIALES Y MÉTODOS 128

4.2. ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN ENSAYADAS EXPERIMENTALMENTE ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

4.2.1 ESTUDIOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y ESTRATEGIAS CON AEROTERMOS 141

Tabla 4.1. Estrategias de calefacción estudiadas. Ventilación cenital nocturna de 5:00 a 9:00 h (en las estrategias que la incluyen). 141

INDICE DE TABLAS

4.2.2. ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS 143

Tabla 4.2. Combinaciones de equipamientos utilizadas en el ajuste del modelo. Campaña 2002/03. 144

Tabla 4.3. Combinaciones ensayadas para el ajuste del modelo en las estrategias sin calefacción y con calefacción por suelo radiante 148

Tabla 4.4. Combinaciones de equipamientos utilizadas en la validación del modelo. Campaña 2003/04 152

5. RESULTADOS 154

5.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CONDENSACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y CON AEROTERMOS 154

Tabla 5.1. Análisis de varianza para las estrategias de calefacción 1, 2, 3, 4 y 5. Años 2002-2003. Número total de días del análisis: 50 154

5.2. OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS 156

5.2.1. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN 156

Tabla 5.2. Resumen de las combinaciones ensayadas para la situación del invernadero sin calefacción 158

Tabla 5.3. Modelos de condensación para estrategias sin calefacción. Presencia de condensación si exp(eta)/(1 + exp(eta)) > valor de corte. 159

Tabla 5.4. Número de días en los que existió o no tanto condensación real como simulada por el modelo en las estrategias sin calefacción 161

Tabla 5.5. Porcentajes de desviación explicados por los modelos estadísticos obtenidos por regresión logística. Modelos de ajuste en situación del invernadero sin calefacción. 164

Tabla 5.6. Probabilidad de condensación real y simulada por los distintos modelos medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9h. Modelos de ajuste en situación del invernadero sin calefacción. 165

5.2.2. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN 167

Tabla 5.7. Combinaciones de parámetros climáticos en las cuatro mejores combinaciones. Estrategias con calefacción. 169

Tabla 5.8. Modelos de condensación en estrategias con calefacción por suelo radiante. Presencia de condensación si exp(eta)/(1 + exp(eta)) > valor de corte. . 169

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.9. Número de días en los que existió o no, tanto condensación real como simulada por el modelo en las estrategias con calefacción por suelo radiante. 170

Tabla 5.10. Porcentajes de desviación explicados por los modelos estadísticos obtenidos por regresión logística. Modelos de ajuste en situación del invernadero con calefacción. 172

Tabla 5.11. Probabilidad de condensación real y simulada por los distintos modelos medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de ajuste en situación del invernadero con calefacción. 173

Tabla 5.12. Probabilidad de condensación real y simulada por el modelo de la combinación A (estudiada para cada estrategia de la Tabla 4.2) medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Situación del invernadero con calefacción. 179

Tabla 5.13. Número de días en los que existió o no, tanto condensación real como simulada por el modelo de la combinación A para cada una de las estrategias con calefacción por suelo radiante (Tabla 4.2). 180

5.3. VALIDACIÓN DEL MODELO..... 183

5.3.1. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN..... 183

Tabla 5.14. Probabilidad de condensación real y simulada por los modelos correpondientes a las combinaciones C y H medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de validación en situación del invernadero sin calefacción. 184

5.3.2. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE 187

Tabla 5.15. Probabilidad de condensación real y simulada por los modelos correspondientes a la combinaciones A y F medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de validación en situación del invernadero con calefacción. 188

RESUMEN

RESUMEN

Las plantas necesitan un ambiente favorable en el que sean capaces no sólo de vivir sino también de producir. Con el control del clima en el invernadero se trata de dotar a la planta de estas condiciones favorables o, al menos, unas condiciones lo más próximas a las óptimas, de manera que se obtengan buenas cosechas no sólo desde el punto de vista cuantitativo sino también cualitativo.

Uno de los mayores problemas que preocupan al productor se produce cuando el aire del invernadero se encuentra saturado y la temperatura desciende. Es en estos casos cuando se producen condensaciones de agua sobre la superficie interna de la cubierta ocasionando, entre otros, efectos desfavorables en el crecimiento y morfología del cultivo y acumulación de agua sobre los cultivos, suelo y estructura del invernadero, provocando la aparición de enfermedades criptogámicas. Este fenómeno suele darse con mayor frecuencia en las primeras horas frías del amanecer, aunque también es posible la condensación durante la noche y a la caída de la tarde, cuando la temperatura desciende bruscamente y el invernadero está húmedo por la transpiración. Los meses problemáticos son desde noviembre hasta mayo; en ciertas zonas los peores periodos son abril y mayo, porque se combinan mayores niveles de radiación solar con mañanas frías.

Con vistas a abordar estos problemas se ha elaborado la presente tesis doctoral, estableciendo un análisis para evaluar el efecto que ejercen diferentes estrategias de ventilación y calefacción sobre la aparición de condensación, así como el desarrollo de modelos de predicción de la probabilidad de aparición de dicha condensación. Los ensayos se llevaron a cabo en un invernadero experimental localizado en Madrid, con

cubierta de metacrilato y estructura de acero galvanizado. Dicho invernadero dispone de ventana cenital y lateral, pantalla térmica y dos sistemas de calefacción: suelo radiante (agua caliente) y aerotermos (aire caliente). En su interior se cultivó *Gerbera jamesonii* (campaña 02/03) y *Helianthus annuus L* (campaña 03/04).

La tesis se estructura en dos partes diferenciadas. En la primera parte se evaluó la influencia del sistema de calefacción sobre la condensación producida. Como sistema de calefacción se utilizaron suelo radiante y aerotermos, ambos ensayados con y sin ventilación durante el principal periodo nocturno. Se ensayaron en total cinco estrategias, realizando un análisis de varianza de los parámetros climáticos para determinar qué combinaciones producían diferencias significativas en la aparición de condensación.

En la segunda parte, con datos del mismo periodo se obtuvieron modelos de predicción de la condensación en situaciones del invernadero sin calefacción y con calefacción por medio de suelo radiante. Para el ajuste del modelo, se estudiaron diferentes estrategias que combinaban la calefacción con la presencia o no de pantalla térmica nocturna y la existencia o no de ventilación cenital nocturna con diferentes grados de apertura de la ventana cenital. Para estimar los diferentes modelos se utilizó un análisis de regresión logística. Una vez obtenidos los modelos, se validaron los cuatro mejores sobre otro conjunto distinto de datos climáticos.

En los experimentos realizados en la primera parte, comparando los valores de la humedad relativa dentro del invernadero, las estrategias que usaban aerotermos redujeron dicha humedad de un 27 a un 34% con respecto a las estrategias que usaban suelo radiante. Asimismo, las estrategias con suelo radiante consiguieron una reducción

significativa de la condensación (del 73%) cuando había ventilación durante la noche. En los casos con calefacción por suelo radiante, la condensación se redujo significativamente con ventilación cenital nocturna con apertura reducida de 25 cm.

En los experimentos realizados en la segunda parte, las estrategias con calefacción por medio de suelo radiante, ventilación cenital diurna (100%) y ventilación cenital nocturna (apertura de 25 cm) presentaron los menores valores de condensación. Las estrategias que utilizaron apertura cenital nocturna de 8 cm no supusieron una mejora para la disminución de la condensación, incluso en las estrategias con calefacción que no utilizaron pantalla térmica, la apertura de 8 cm produjo un 5% más de condensación que cuando no se dispuso de ventilación nocturna. Las estrategias de calefacción que utilizaron pantalla térmica presentaron menores valores de condensación media diaria. La pantalla térmica retiene el calor y el aire del invernadero alcanza una temperatura superior, disminuyendo la humedad relativa y por tanto las posibilidades de condensación.

SUMMARY

SUMMARY

Plants need a favorable environment in which they are able not only to live but also to produce. Climate control in the greenhouse try to equip the plant in these terms, or at least conditions as close to the optimum, so as to obtain good harvests not only from a quantitative but also qualitative point of view .

One of the biggest problems of concern to the producer occurs when the air is saturated in the greenhouse and the temperature drops. It is in these cases when condensation of water occurs on the inner surface of the cover causing among others, adverse effects on growth and morphology of the crop and accumulation of water on crop, soil and structure of the greenhouse, causing the onset of cryptogamic diseases. This phenomenon usually occurs more frequently in the early hours of dawn cold, but it is also possible condensation during the night, and at the end of the afternoon when the temperature drops sharply and the greenhouse has more relative humidity because of crop transpiration. Problematic are the months from november through may; in some areas the worst periods are april and may, due to higher levels of solar radiation combined with cold mornings.

In order to tackle these problems, the present doctoral thesis, has established a review to evaluate the effect of different ventilation and heating strategies on greenhouse condensation and models for predicting the probability of occurrence of such condensation have been developed. Trials were carried out in an experimental greenhouse located in Madrid, with methacrylate cover and galvanized steel structure. This greenhouse has a ridge roof vent running the length of the greenhouse and side vent, screen and two heating systems: heated floor (hot water) and air heaters (hot air).

During 2002-2003, *Gerbera jamesonii* was grown in pots inside the greenhouse. During 2003-2004 *Helianthus annuus L* was cultivated in the same pots inside.

The thesis is divided into two distinct parts. In the first part the influence of the heating system on the condensation inside the greenhouse was evaluated. The heating system consisted of heated floor and air heaters, both tested with and without ventilation during the main period of the night. Five different strategies were tested. An analysis of variance of climate parameters was carried out to determine which combinations produced significant differences.

In a second part, condensation models were developed with data from the same period in order to predict condensation in different greenhouse situations, without heating and with heating by means of heated floor. For the model adjustment, different strategies that combined heating (heated floor) with or without thermal screen at night and the presence or not of night ventilation with different opening degrees for roof vent were studied. A logistic regression analysis was used to estimate all models. Once the models were obtained, the best four were validated on another period of climate data.

In experiments conducted in the first part, comparing the values for relative humidity inside the greenhouse, strategies using air heaters reduced the humidity by 27 to 34% with respect to the strategies using heated floor. Heated floor strategies achieved a significant condensation reduction (73%) when there was ventilation during night. Indeed, in these cases, condensation was significantly reduced with 25 cm opening in roof vent during night.

In experiments conducted in the second part, strategies using heated floor, roof vent during day (100%) and roof vent during night (opening of 25 cm) showed the lowest condensation values. Strategies using roof vent during night with 8 cm opening did not represent an improvement for condensation reduction, even in heating strategies without thermal screen, the 8 cm roof vent opening produced 5% more condensation than that strategy without night ventilation. Heating strategies using thermal screen achived lower values of mean daily condensation (%). Thermal screen retains heat and greenhouse air reaches higher temperature, decreasing relative humidity and therefore condensation probability.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ASPECTOS GENERALES

Un invernadero es un sistema productivo capaz de proporcionar cosechas fuera de la época normal en la que se producen al aire libre; su objetivo es condicionar los principales elementos del clima entre límites que estén de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo, de forma que el sistema resulte económicamente rentable (García *et al.,* 1999).

Las principales ventajas e inconvenientes del uso de invernaderos se pueden resumir en (www.infoagro.com, 2003a):

VENTAJAS

- ✓ Precocidad en los frutos.
- ✓ Aumento de la calidad y del rendimiento.
- ✓ Producción fuera de época.
- ✓ Ahorro de agua y fertilizantes.
- ✓ Mejora del control de plaga y enfermedades.
- ✓ Posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año.

INCONVENIENTES

- ✓ Alta inversión inicial.
- ✓ Alto coste de operación.
- ✓ Necesidad de personal especializado, con conocimientos teóricos y experiencia práctica.

Un invernadero bien diseñado debe combinar varias cualidades: estar bien adaptado a los recursos locales; ser eficiente en el acondicionamiento del clima; ser técnicamente funcional, de forma que las operaciones en su interior puedan ser ágiles y cómodas; conseguir un producto de calidad; y estar bien orientado en su producción para la comercialización y el éxito en el mercado (García *et al.*, 1999).

Actualmente existe una gran exigencia de calidad y tecnificación del cultivo por lo que el sector de producción en invernadero está tendiendo a tener una importancia indiscutible. De hecho, prácticamente cualquier tipo de agricultura, para ser rentable, debe ser muy tecnificada y el agricultor o técnico agrícola debe dominar una serie de técnicas de producción para conseguir ser competitivo.

1.2. PRINCIPALES ZONAS DE PRODUCCIÓN EN INVERNADERO EN EL MUNDO

1.2.1. HISTORIA

El cultivo protegido es muy antiguo y las referencias al uso de protecciones se remontan a los primeros siglos de nuestra era. Los primeros intentos documentados de cultivo protegido se remontan a la época del imperio romano, durante el reinado del emperador Tiberio César, al emplear pequeñas estructuras móviles para el cultivo del pepino, que se sacaban al exterior si el tiempo era propicio o se guardaban a cubierto en caso de inclemencias climáticas (Wittwer *et al.*, 1995). Séneca consideraba estas prácticas antinaturales y condenó su uso.

Estos métodos de cultivo desaparecieron con el declive del imperio romano y hasta la época del Renacimiento (del siglo XVI al XVIII) no aparecieron los precursores de los invernaderos, inicialmente en Inglaterra, Holanda, Francia, Japón y China (Enoch et al., 1999).

En el siglo XIX aparecen los primeros invernaderos con cubierta a dos aguas y el cultivo de uvas, melones, melocotones y fresas se generaliza. A finales de este siglo se introducen los tomates (hortaliza que, años antes, era considerada venenosa).

Pronto se expandieron los invernaderos desde Europa a América y Asia, ubicándose en las cercanías de las grandes ciudades (Enoch *et al*., 1999). Ya en el siglo XX, el desarrollo económico impulsó, especialmente tras la Segunda Guerra Mundial, la construcción de invernaderos de cristal. Holanda superó las 5.000 ha a mediados del siglo XX, mayoritariamente dedicadas al cultivo del tomate (Castilla *et al*., 2007).

Gracias a la aparición de los plásticos se produjo una expansión enorme de la superficie de invernaderos en el Oriente (Japón y China principalmente) y en los países mediterráneos (con España e Italia a la cabeza de la superficie).

En Europa, la crisis energética y la introducción de los plásticos contribuyeron al desplazamiento, en parte, de la producción de hortalizas en invernadero desde los países del norte (Holanda, principalmente) al litoral mediterráneo, donde los invernaderos de plástico, más económicos, permitieron la producción a bajo coste de hortalizas fuera de estación (Castilla, 1994). La mejora de las redes de transporte facilitó la distribución de la producción a los mercados nacionales y europeos, cuya demanda crecía impulsada por el desarrollo económico.

Paralelamente, se produjo en el Norte de Europa un cambio en las producciones de los invernaderos, incrementándose el cultivo de flor cortada y ornamental, a costa de las hortalizas.

Podría decirse que existen dos concepciones básicas de invernadero (Enoch, 1986). La primera (típica del Norte de Europa) persigue el máximo control climático del medio

ambiente para optimizar la producción, precisando del empleo de invernaderos sofisticados. La otra concepción, que persigue un mínimo control climático empleando invernaderos poco tecnificados, permite producir en condiciones subóptimas a un bajo coste, y es típica de los invernaderos mediterráneos. La elección entre una concepción u otra (existe una graduación entre ambos extremos) depende del tipo de especie a cultivar, de su ubicación, de las posibilidades financieras y de las condiciones socioeconómicas locales.

El suministro de frutas, hortalizas y flores frescas que el consumidor demanda puede hacerse por tres procedimientos (Enoch *et al*., 1999):

- Cultivando en invernadero en las proximidades de los centros de consumo.
- Almacenando los productos, después de su recolección, para comercializarlos con posterioridad.
- Transportando los productos desde otras áreas climáticas, donde se producen naturalmente, a los centros de consumo.

Hoy día, no sólo coexisten estos tres procedimientos, sino que incluso está presente el método mixto de producir en invernadero en áreas de clima suave, como el Mediterráneo, para transportar a los grandes centros de consumo europeos.

1.2.2. ZONAS MUNDIALES DE PRODUCCIÓN

El área mediterránea (que incluye todos los países ribereños y Portugal) en 1987 lideraba la superficie mundial de invernaderos con 65.000 ha (Nisen *et al.*, 1990) y alcanzó las 200.000 ha en el 2006 (Tabla 1.2) mayoritariamente cubiertos de plástico.
Los invernaderos de plástico llegan a suponer en países como España el 99% de la superficie total, estimada en 53.843 ha en el año 2005 (Tabla 1.2), que duplica la superficie existente diez años antes (Castilla, 2007).

En Japón, que fue el país líder en invernaderos en el pasado, los invernaderos de vidrio representan sólo el 5% del total (Ito, 1999). De modo similar, en China la cubierta de plástico es absolutamente mayoritaria, con un espectacular crecimiento, pues siendo prácticamente inexistentes los invernaderos en 1980, la superficie en 2004 superaba las 1.496.000 ha (Zhang, 2006), de las que el 40% corresponden al tipo adosado ("lean–to"), siendo el resto tipo túnel alto, pues la superficie cubierta de vidrio es mínima (Zhibin, 1999).

Los invernaderos de vidrio tan sólo son mayoritarios en algunas áreas de América del Norte y en países del Norte de Europa, donde suponen del 90% de la superficie en Alemania al 98% en Holanda, totalizando algo menos de 25.000 ha en toda la Unión Europea (Von Elsner et al., 2000).

Tabla 1.1. Superficies estimadas (en miles de ha) de cultivo protegido en el mundo en el año 2006. El apartado de invernaderos incluye los túneles altos.

	ÁREA GEOGRÁFICA					
Protección	**Asia**	**Mediterráneo**	**Resto de Europa**	**América**	**Otros**	**Total**
Acolchado	9.870	402	65	265	15	10.617
Cubierta flotante	22	16	39	13	15	105
Pequeño túnel	1.079	133	9	20	5	1.246
Invernaderos	1.611	201	45	25	4	1.886

Fuente: Castilla et al., 2007

Tabla 1.2. Distribución global de invernaderos y túneles bajos en el Mediterráneo en el año 2006.

País	Invernaderos (ha)	Túneles bajos (ha)
España	53.843	13.055
Italia	42.800	30.000
Turquía	30.669	17.055
Francia	11.500	15.000
Marruecos	11.310	3.770
Egipto	9.437	25.000
Israel	6.650	15.000
Argelia	6.000	200
Ex Yugoeslavia	5.040	--
Grecia	5.000	4.500
Siria	4.372	50
Líbano	4.000	700
Libia	3.000	--
Portugal	2.700	100
Jordania	1.989	718
Túnez	1.579	7.316
Albania	415	--
Chipre	280	280
Malta	55	102
TOTAL	200.639	132.846

Fuente: Castilla et al., 2007

1.2.3. LA EXPLOTACIÓN HORTÍCOLA DE INVERNADEROS EN ESPAÑA

Aunque en la horticultura protegida española existen explotaciones de diverso tamaño, en general se puede hablar de un tamaño medio pequeño que, referido a la provincia de Almería, oscila entre 1,5 y 2,4 ha, aunque su variabilidad es alta. Normalmente es explotada por mano de obra familiar (Martínez-Carrasco, 2001; Pérez *et al.*, 2002). El nivel tecnológico es bajo, con predominio del invernadero tipo parral sin equipamientos complementarios de climatización.

La gama de especies cultivadas es enorme. Si se centra en las especies de hortalizas, destacan pimiento, tomate y melón, en primer lugar, seguidos de sandía y pepino y en menor proporción de calabacín, berenjena, col china, judía de mata, etc (Castilla, 2007). Actualmente el 90% de la tenencia de tierra es en propiedad, estando disminuyendo los porcentajes de aparcería y arrendamiento durante los últimos años (Martínez-Carrasco, 2001).

La planificación de las producciones por parte de los agricultores y de las empresas que comercializan es limitada. Su principal criterio de elección suele ser el grado de conocimiento y de especialización del agricultor en el cultivo de dicha especie así como el asesoramiento técnico de las empresas que comercializan (Martínez-Carrasco, 2001).

Por lo general, la infraestructura productiva en Almería está basada en invernadero tipo parral, cultivo mayoritario en suelo, regado en su práctica totalidad por goteo (99,7%), con muy limitado uso de la calefacción (por aire caliente o por agua a baja temperatura), uso generalizado de ventilación pasiva y escaso empleo de sistemas de nebulización (Pérez *et al.*, 2002).

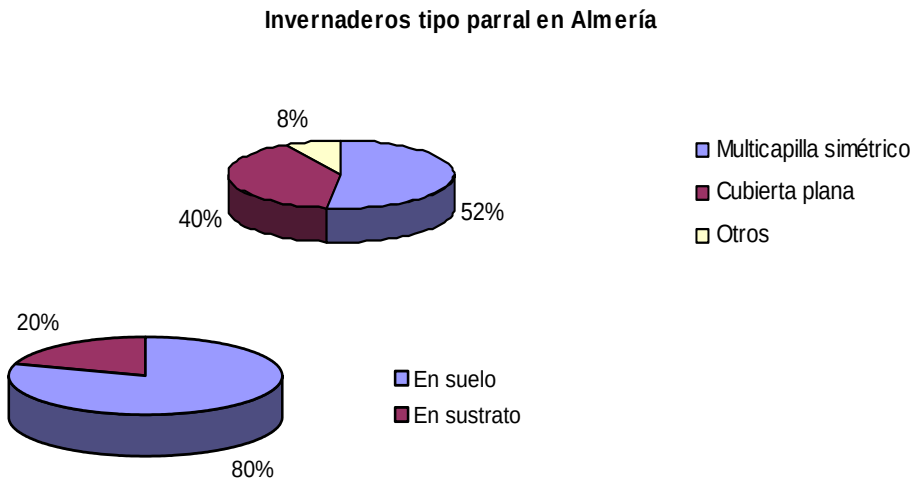


Figura. 1.1. *Tipos de invernadero parral en Almería y distribución de cultivos en suelo y en sustrato. Elaboración propia a partir de datos obtenidos en Castilla, 2007.*

Junto con la horticultura existe otra actividad que también emplea el cultivo intensivo bajo abrigo y en invernadero como es la producción de flores y plantas ornamentales que en España y para el año 2005 supone una superficie destinada a flores de 2.772 ha, de las cuales el 70% (1.940 ha) se obtienen en invernadero; y en plantas ornamentales es de 3.048 ha, de las cuales el 31% (945 ha) proceden de invernadero (Melián Navarro *et al.*, 2008).

La producción en 2005 ha sido de 532.742 miles de docenas, distribuidas del siguiente modo: un 61% claveles, un 9% rosas y un 30% otras flores. En plantas ornamentales se han obtenido este año 191.836 miles de plantas (MAPA, 2007).

Resumen superficie (hectáreas) y producción flores y plantas ornamentales. Año 2005.

CULTIVOS	SUPERFICIE			PRODUCCIÓN
	Al aire libre	Protegido	Total	Miles docenas
Claveles	284	809	1.094	327.566
Rosas	72	303	375	45.203
Otras flores	476	826	1.302	159.973
Total flores	832	1938	2.772	532.742
Plantas ornamentales	2.038	960	3.048	191.836
Esquejes	23	85	108	1.779

Fuente: MAPA 2007. Anuario estadística agroalimentaria 2006. Producción en plantas ornamentales en miles de plantas y en esquejes en toneladas.

1.2.4. PERSPECTIVAS FUTURAS

En el comienzo del nuevo siglo, los principales problemas que se plantean en cultivo en invernadero en zonas de clima benigno, como el Mediterráneo, son los costes de producción, la calidad del producto y el impacto ambiental (La Malfa *et al.*, 2001).

La globalización de los mercados ha incrementado la competencia entre productores, que se ven en la necesidad de aumentar la calidad del producto mediante un mejor control climático de los invernaderos.

Es necesario llegar a un compromiso entre los mayores costes de producción en invernaderos mejor equipados y sus prestaciones agronómicas, para producir la calidad requerida a costes competitivos (Castilla *et al*, 2004). Es necesario, por tanto, no sólo generar la información y profundizar en el conocimiento de estos sistemas (Valls, 2002) sino transferir también esta información a los agricultores y capacitarlos para su uso adecuado.

1.3. ELECCIÓN DEL INVERNADERO

Para realizar la elección de un determinado tipo de invernadero en una zona concreta, hay que considerar los siguientes puntos:

- Las especies vegetales a cultivar: Hortícolas u ornamentales.
- El cultivo elegido va a determinar las condiciones climáticas necesarias.
- Tipo de invernadero y equipamiento a escoger en función de dichas condiciones climáticas.

De forma general se podría elegir entre invernaderos fríos, sin ningún equipamiento de calefacción, sin grandes exigencias de aislamiento y con pocas posibilidades de control de su clima interior; e invernaderos calientes, con equipamiento de calefacción y mayores posibilidades de control de sus condiciones ambientales interiores. El uso de calefacción obliga a mejorar las condiciones de estanqueidad del invernadero para reducir las pérdidas de energía.

1.3.1. ESPECIES VEGETALES

Para la elección de las especies vegetales a cultivar, ya sean hortícolas u ornamentales, es necesario considerar la comercialización y posibilidades de mercado de las especies elegidas, ya que son claves en la rentabilidad del proyecto. Una vez realizada la elección, el cultivo determinará las condiciones climáticas necesarias en el interior del invernadero.

1.3.2. FORMA Y ORIENTACIÓN DEL INVERNADERO

El invernadero puede ser de tipo capilla a una o dos aguas, de techo curvo, de tipo parral, etc. La forma del invernadero influye especialmente en la captación de la energía solar, por lo que esta decisión se toma en función de los niveles de radiación solar de la zona en la que se pretende situar el invernadero. Está comprobado que existe una fuerte relación entre la forma de la cubierta y la captación de radiación solar. De hecho, las cubiertas curvas captan más radiación que las cubiertas a dos aguas y éstas más que las planas. En las cubiertas a dos aguas, a medida que aumenta la pendiente, aumenta también la radiación captada.

La orientación de los invernaderos es otro de los aspectos a considerar. En general si se trata de un invernadero aislado, resulta más interesante colocar su eje longitudinal en la dirección este-oeste, ya que la captación de energía solar es mayor, sobre todo durante el periodo invernal. Si el proyecto incluye un cierto número de invernaderos (por ejemplo varios túneles) se debe dejar la suficiente distancia entre ellos para no producir sombreos indeseados.

Si esto no fuera posible, se pueden colocar con el eje longitudinal en la dirección norte-sur, con lo que un invernadero producirá menos sombra sobre el siguiente. En todo caso, muchas veces la forma de la parcela existente condiciona de manera importante la orientación a elegir.

Si el invernadero es de los de tipo multitúnel o Venlo, la dimensión más larga del conjunto se coloca en la dirección este-oeste, para captar la máxima radiación; los distintos módulos o capillas, sean de techo curvo o a dos aguas, se colocan en la

dirección norte-sur, de forma que el sombreo de los diferentes elementos estructurales se distribuya con el movimiento del sol.

Las líneas de cultivo se colocan en la dirección norte-sur para evitar que cada línea sombree a la siguiente.

Cuando la radiación no es uno de los factores limitantes en la zona considerada, ni siquiera en invierno, la lógica aplicada dejaría de tener sentido. La orientación del eje longitudinal del invernadero en la dirección norte-sur consigue más luz por la mañana y por la tarde y menos luz a las horas del mediodía, lo cual puede resultar ventajoso en determinadas zonas.

1.3.3. ESTRUCTURA DEL INVERNADERO

Para la estructura resistente del invernadero pueden emplearse materiales como la madera, acero, aluminio u hormigón. Las estructuras de madera son más económicas pero su principal inconveniente es que debido a la menor resistencia de la madera, se hace necesaria la presencia de mayor número de soportes, produciéndose un mayor sombreo y dificultando algunas operaciones en su interior.

El hormigón produce estructuras más pesadas y voluminosas y además intercepta una mayor radiación, lo que conlleva una reducción de la iluminación, por eso se utiliza menos que las estructuras metálicas.

De esta forma, los invernaderos con estructura portante metálica son los más utilizados, especialmente con acero galvanizado (el aluminio tiene un coste mayor). Estas estructuras permiten un buen aislamiento y la instalación de todos los equipos.

1.3.4. MATERIALES DE CUBIERTA

Respecto al material de cubierta se puede utilizar vidrio, plásticos rígidos o plásticos flexibles. Todo depende de la estanqueidad que se desee alcanzar en el invernadero, además de la transparencia y resistencia necesarias.

El vidrio utilizado en invernaderos es el llamado vidrio impreso o catedral de 4 mm de espesor, con la cara interior rugosa, de manera que difunda la luz que pasa a través del cristal en todas las direcciones haciendo que disminuya la radiación directa que incide sobre las plantas. La transparencia es cercana al 90%. Las ventajas del cristal son su inalterabilidad frente al calor, humedad y tratamientos en el invernadero, no envejece ni pierde transparencia además de ser casi totalmente opaco a las radiaciones infrarrojas que emiten las plantas y el suelo por la noche, lo que impide las pérdidas de calor.

Sus principales inconvenientes son: su coste elevado, su mayor peso que obliga a estructuras más resistentes, es frágil y se rompe con facilidad ante golpes e incluso ante vibraciones producidas por el viento si no está bien sujeto a la estructura.

Los plásticos rígidos más utilizados son el poliéster reforzado con fibra de vidrio, el PVC, el metacrilato, el policarbonato y el policarbonato alveolar. El poliéster reforzado con fibra de vidrio se presenta en forma de placas onduladas y es por lo general el plástico rígido más económico y presenta bastante resistencia aunque su mayor problema es la pérdida de transparencia que sufre con el paso del tiempo.

El PVC, el policarbonato y el metacrilato son materiales de coste similar, quizá más barato el primero y algo más caro el último. El PVC puede tener problemas de dilatación en climas cálidos.

El metacrilato es posiblemente el mejor material en placas simples; su transparencia está entre el 85 y 92% y se mantiene bastante bien con el paso del tiempo. Es bastante opaco a la radiación infrarroja y resistente a daños mecánicos.

En plásticos rígidos se pueden utilizar placas dobles. El policarbonato alveolar se presenta como dos placas unidas transversalmente por paredes del mismo material, dejando cámaras de aire entre las dos placas. Su comportamiento térmico es excepcional ya que las cámaras de aire lo convierten en un material con menores pérdidas de calor que el vidrio, pero es más caro que éste. Su transparencia inicial es similar a la del vidrio, pero disminuye con el tiempo, además puede tener problemas de condensación en el interior, con aparición de algas. Tiene cierta flexibilidad por lo que puede usarse en techos ovalados.

Los plásticos flexibles más utilizados son el polietileno de baja densidad, el PVC y el acetato de etilenvinilo (EVA). El polietileno es ampliamente utilizado en España. Existen tres tipos en el mercado: normal, de larga duración y térmico. El normal es transparente a la radiación infrarroja y su duración es menor de un año, ya que se daña por la radiación ultravioleta. El polietileno de larga duración lleva antioxidantes e inhibidores de rayos ultravioletas, por lo que su duración se extiende a 2 ó 3 años. El polietileno térmico es casi opaco a la radiación infrarroja, es de larga duración, difunde bien la luz y, en general, no produce goteo de agua por condensación. Es el más recomendado para invernaderos en España, pero tiene como principal desventaja que es poco resistente a la rotura y se desgarra con facilidad. Es el material plástico de cubierta que menos pesa, fácil de soldar y pegar, con una transparencia del 70-85%.

El PVC flexible es más transparente a la radiación que el polietileno (entre el 80 y 87%). Es bastante opaco a la radiación infrarroja. Envejece más lentamente y es más resistente a la rotura que el polietileno normal; dura entre 2 y 3 años. No produce condensaciones de agua pero tiene el inconveniente de fijar bastante polvo.

El copolímero EVA es un polietileno modificado con acetato de vinilo. Tiene unas características similares a la lámina de polietileno cuando su porcentaje de acetato de vinilo es bajo, y es parecido al PVC cuando el porcentaje el alto. En climas cálidos da problemas por sufrir dilataciones que dan lugar a bolsas de agua de lluvia y a rotura por el viento, resulta por ello más recomendable en climas frescos del norte de España.

En la Tabla 1.3 se exponen las características de duración de distintos plásticos frente a la radiación solar.

Tabla 1.3. Duración de plásticos normalizados para invernaderos.

Tipo de plástico	Espesor	Duración (en Almería)	Radiación solar recibida
Polietileno "normal" (sin aditivos)	150 micras (600 galgas)	6-8 meses	< 148 kcal/cm^2
Polietileno "larga duración"	180 micras (720 galgas)	2 años	296 kcal/cm^2
Polietileno "Térmico larga duración"	200 micras (800 galgas)	2 años	296 kcal/cm^2
Copolímero EVA (12 % AV)	200 micras (800 galgas)	2 años	296 kcal/cm^2
Copolímero EVA (6 % AV)	100 micras (400 galgas)	1 año	148 kcal/cm^2

Fuente: Serrano, 1994

La última tendencia es utilizar plásticos tricapa, que combinan tres capas de plásticos por coextrusión. Una combinación habitual es utilizar EVA, por su transparencia y resistencia, en la capa central, y polietileno con aditivos en las capas exteriores; por ejemplo, polietileno tratado contra los rayos ultravioleta al exterior y polietileno con tratamiento antivaho en la capa interior.

A continuación, en la Tabla 1.4 se exponen las principales características de los diferentes plásticos utilizados en invernaderos.

Tabla 1.4. Características comparadas de los principales materiales plásticos utilizados en cubierta de invernadero.

	FLEXIBLES		RÍGIDOS			
	Polietileno	**PVC**	**PVC ondulado**	**Polimetacrilato de metilo**	**Poliéster estratificado**	**Cristal**
Características	(0.08 mm)	(0.1 mm)	(1-2 mm)	(4 mm)	(1-2 mm)	(2.7 mm)
Densidad	0.92	1.3	1.4	1.18	1,5	2.40
Índice de refracción	1.512	1.538	-	1.489	1.549	1.516
% de dilatación antes de que se rompa	400-500	200-250	50-100	escasa	escasa	nula
Resistencia al frío y calor	-40+50ºC	-10+50ºC	-20+70ºC	-70+80ºC	-70+100ºC	muy elev.
Duración	2 años	2-3 años	elevada	elevada	elevada	elevada
Transparencia % (0,38-0,76 micrones)	70-75	80-87	77	85-93	70-80	87-90
Transmisión % (-0,24-2,1 micrones)	80	82	82	73	60-70	85
Transmisión % (7-35 micrones)	80	30	0	0	0	0

Fuente: Serrano, 1994

1.3.5. EQUIPAMIENTO DEL INVERNADERO

El equipamiento del invernadero puede incluir todo tipo de sistemas para conseguir las condiciones ambientales y de nutrición óptimas para el desarrollo vegetal: sistemas de riego y fertirrigación, generación y distribución del calor en el volumen del invernadero, refrigeración, equipos de ahorro energético, sombreo, enriquecimiento con CO_2, iluminación artificial complementaria y diferentes equipos informáticos y de control.

Para decidir el equipamiento necesario dentro de un invernadero, es necesario tener en cuenta un cierto número de factores. Las condiciones climáticas, la calidad del suelo y

del agua de riego, el suministro de energía eléctrica y la red viaria y de comunicaciones pueden influir en la ubicación de la instalación, aunque en este sentido, la facilidad de comercialización suele ser determinante.

Las condiciones climáticas y el tipo de cultivo suelen determinar el tipo de invernadero a elegir. Siempre es interesante, de cara a optimizar los recursos e instalaciones utilizados en el invernadero, conocer la intensidad de la radiación solar, el régimen de vientos y la evolución de la temperatura y humedad relativa en sus valores medios, diarios, extremos y estacionales en la zona donde va a situarse el invernadero en cuestión.

1.4. VARIABLES CLIMÁTICAS A CONTROLAR

Las plantas necesitan un ambiente favorable en el que sean capaces no sólo de vivir sino también de producir. Con el control del clima en el invernadero se trata de dotar a la planta de estas condiciones favorables, o al menos unas condiciones lo más próximas a las óptimas, de manera que se obtengan buenas cosechas no sólo desde el punto de vista cuantitativo sino también cualitativo.

Si el clima del invernadero se vuelve desfavorable para la planta, las plantas se resienten y debilitan haciéndose más vulnerables de cara a enfermedades y originando problemas fisiológicos.

Es por esto por lo que se hace necesario un manejo del clima interior del invernadero consiguiendo las condiciones óptimas o cercanas a éstas de los cultivos que se vayan a producir en su interior.

Los cultivos necesitan, según el estado de crecimiento en el que se encuentren, unos valores determinados de las siguientes variables climáticas: Temperatura, humedad relativa; luz y CO_2.

En función de en qué estado de desarrollo se hallen, existen unos valores mínimos y máximos de dichas variables fuera de los cuales el cultivo podría cesar su actividad metabólica o incluso llegar a la muerte (www.infoagro.com, 2003b).

1.4.1. TEMPERATURA

La temperatura es el parámetro de mayor importancia a controlar dentro del invernadero ya que es el que presenta una mayor influencia sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Cada cultivo tiene su temperatura óptima. Normalmente se puede hablar de un rango entre 10 y 25ºC.

Para un correcto manejo de la temperatura, es necesario conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Es importante definir los siguientes conceptos:

- Temperatura mínima letal: Aquella por debajo de la cual los daños producidos sobre la planta son irreversibles.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas: Indican respectivamente valores, por encima y por debajo de los cuales, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas: Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta en cada periodo.

La mayoría de las especies hortícolas comestibles cultivadas en invernadero en el litoral mediterráneo presentan una gran reducción de la actividad metabólica por debajo de 10 a 12ºC (Nisen *et al.*, 1988), variando los rangos de temperatura óptimas entre 15 y 20ºC durante la noche y entre 22 y 28ºC durante el día (Tesi, 2001). La Tabla 1.5 recoge los rangos de temperaturas óptimas del aire y del sustrato en diversos cultivos hortícolas.

Tabla 1.5. Niveles térmicos óptimos del aire y del sustrato en diversos cultivos hortícolas.

Cultivo	Aire (ºC)		Sustrato (ºC)
	Día	Noche	
Tomate	22-26	13-16	15-20
Pepino	24-28	18-20	20-21
Melón	24-30	18-21	20-22
Judía	21-28	16-18	15-20
Pimiento	22-28	16-18	15-20
Berenjena	22-26	15-18	15-20
Lechuga	15-18	10-12	10-12
Fresa	18-22	10-13	12-15
Clavel	18-21	10-12	10-15
Rosa	20-25	14-16	15-18
Gerbera	**20-24**	**13-15**	**18-20**
Gladiolo	16-20	10-12	10-15

Fuente: Castilla 2007

1.4.2. HUMEDAD RELATIVA

La humedad absoluta es la masa de vapor de agua por unidad de volumen o por unidad de masa de aire.

La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener esa misma masa de aire y a esa misma temperatura. Se produce una relación inversa entre temperatura y humedad, de hecho, cuanto mayor es la temperatura, mayor es la capacidad de contener vapor de agua de ese aire, y por lo tanto disminuye la humedad relativa. Por el contrario, cuando baja la temperatura del aire, éste es capaz de contener una menor cantidad de vapor de agua, con lo que aumenta la humedad relativa.

Cuando el aire del invernadero se encuentra saturado y la temperatura desciende, se producen condensaciones o agrupaciones de moléculas de agua formando gotas líquidas. Este fenómeno suele darse con mayor frecuencia en las primeras horas frías del amanecer, aunque también es posible la condensación durante la noche y a la caída de la tarde, cuando la temperatura desciende bruscamente y el invernadero está húmedo por la transpiración (Perales *et al.,* 2003).

Los meses problemáticos son desde noviembre hasta mayo; en ciertas zonas los peores periodos son abril y mayo, porque se combinan mayores niveles de radiación solar con mañanas frías. Al amanecer, los rayos del sol inciden sobre la planta haciendo que aumente la transpiración y aumentando la humedad absoluta del aire del invernadero. Sin embargo, la temperatura de la planta y de la cubierta aumenta lentamente.
Por ello, al ponerse en contacto el aire del invernadero con estas zonas frías (ya sea en la cubierta o en el propio cultivo), pueden producirse fenómenos de condensación.

En los invernaderos se producen gradientes verticales de temperatura y, como la humedad absoluta se distribuye más o menos homogéneamente por todo el invernadero, se producen también gradientes de humedad relativa en altura. En aquellos puntos donde la humedad relativa llega al 100% se produce la condensación.
Analizando los sistemas de calefacción, si se utiliza una calefacción de tuberías de agua caliente, hay más riesgo de condensación en la cubierta, mientras que si se utiliza una calefacción por aire caliente, el riesgo de condensación se hace mayor al nivel del cultivo. Por lo general, la calefacción por aire caliente es más eficaz frente a los problemas de condensación en invernaderos.

Obviamente, cuando no se utiliza ningún sistema de calefacción el riesgo de condensaciones es igual tanto a nivel de la planta como en la zona de cubierta (Perales *et al.*, 2003).

Al igual que ocurría con la temperatura, cada especie tiene un rango de valores de humedad relativa, dentro de los cuales puede vegetar en perfectas condiciones. Cuando la humedad relativa es excesiva, las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor riesgo de enfermedades criptogámicas. Por otro lado, si la humedad relativa es demasiado baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, además de los problemas comunes del mal cuajado.

Una humedad excesiva puede corregirse mediante técnicas de ventilación, aumento de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta de humedad dentro del invernadero puede corregirse mediante riegos, llenando canalillas o balsetas de agua o pulverizando agua en el ambiente ventilado y sombreado. Tras diversos estudios, se recomienda una ventilación cenital con apertura de más de 40 cm tanto para el control de la temperatura como de la humedad absoluta.

En concreto para el caso de la gerbera, humedades comprendidas entre el 75 y 90% no presentan problemas, pero valores mayores pueden favorecer el desarrollo de enfermedades como Botrytis. Por ello, se recomienda un control exhaustivo de la ventilación durante los meses de invierno. Las oscilaciones elevadas entre el día y la noche y entre diferentes periodos pueden afectar a la calidad de la flor, disminuyendo su conservación en vaso. Humedades relativas superiores al 90% pueden provocar manchas y deformaciones en las flores durante el invierno (www.infoagro.com., 2002).

En los meses de temperaturas elevadas y fuerte ventilación se crean condiciones de humedad relativa reducida que pueden afectar a la implantación del cultivo, por lo que se aconseja sombrear y aplicar riego por aspersión o nebulización.

1.4.3. ILUMINACIÓN

Cuanto mayor sea la luminosidad dentro del invernadero, mayores deben ser la temperatura y la cantidad de CO_2 para que la fotosíntesis sea máxima. Por el contrario, si hay poca luz pueden disminuir las necesidades de otros factores.

Dentro de los sistemas para mejorar la luminosidad natural están los siguientes:

- Utilizar materiales de cubierta con buena transparencia.
- Materiales que reduzcan al mínimo las sombras interiores.
- Orientar de forma adecuada el invernadero.
- Aumentar el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la cubierta del invernadero.
- Utilizar los acolchados blancos en el suelo.



Figura 1.2. *Invernadero dotado con acolchado blanco sobre el suelo para mejorar la iluminación natural.*

Cuando el problema sea un exceso de luminosidad, como puede ocurrir en muchas zonas durante el verano, las actuaciones que se pueden utilizar para reducir esa luminosidad se resumen en:

- Blanqueo de cubiertas.
- Acolchados de plástico negro en el suelo.
- Uso de mallas de sombreo.



Figura 1.3. *Invernadero dotado con encalado y blanqueo de cubierta para reducir la cantidad de radiación que llega al invernadero.*



Figura 1.4. *Invernadero dotado con pantalla térmica para reducir la cantidad de radiación que llega al invernadero.*

La gerbera se considera como una especie indiferente al fotoperiodismo, aunque la luz le influye en la emisión de los brotes laterales, que darán lugar a nuevas flores. La luz influye en el diámetro del pedúnculo floral, en el color y en la tonalidad de las flores.

A mayores niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR), mayor número de flores. Pueden presentarse problemas en otoño-invierno, al instalar doble malla paralela al suelo, ya que disminuye la incidencia de radiación sobre las plantas. Algunos cultivares pueden presentar pedúnculos excesivamente largos y poco diámetro y las inflorescencias pueden ser de diámetro muy reducido. Durante la primavera y el verano la elevada intensidad luminosa, acompañada de altas temperaturas, provoca un fuerte crecimiento vegetativo y disminuye la calidad de la producción, por lo que es conveniente sombrear el cultivo mediante la utilización de mallas, el encalado de los techos de los invernaderos o mediante la combinación de ambos sistemas (www.infoagro.com, 2002).

1.4.4. CO_2

El dióxido de carbono de la atmósfera es la materia prima imprescindible para la función clorofílica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO_2 puede resultar bastante interesante en muchos cultivos, tanto en flores como en hortalizas.

La concentración normal de CO_2 en la atmósfera es de 300 ppm. Este límite debería aumentarse hasta valores de 1.000-2.000 ppm cuando los demás factores climáticos de la producción vegetal sean óptimos si se desea aprovechar al máximo la actividad fotosintética del cultivo. Pero hay que controlar los valores máximos, ya que valores superiores a 3.000 ppm podrían resultar tóxicos para algunos cultivos.

En aquellos invernaderos en los que no se aplique CO_2, la concentración de este gas es muy variable a lo largo del día, alcanzando valores máximos al final de la noche y mínimos en las horas de máxima luz.

Los niveles aconsejados de dióxido de carbono dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y humedad. El óptimo de asimilación de este gas se encuentra entre los 18 y 23ºC, descendiendo por encima de los 23-24ºC. Cada especie tiene un óptimo de valores de luminosidad y humedad (mm).

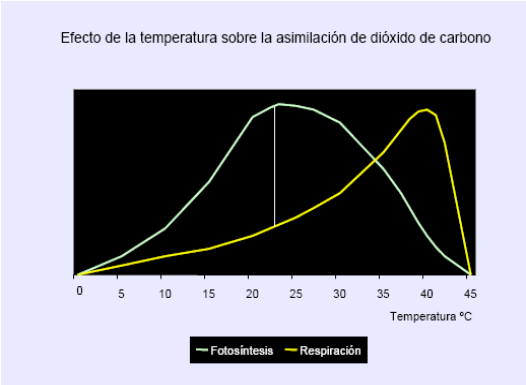


Figura 1.5. *Efecto de la temperatura sobre la asimilación de dióxido de carbono del cultivo.*

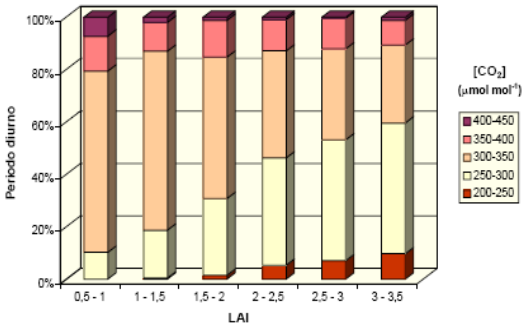


Figura 1.6. *Concentración de CO_2 en el interior del invernadero en función del periodo del día y en función del Índice de Área Foliar del cultivo.*

El aporte de CO_2 favorece el desarrollo y la producción de gerberas. El umbral mínimo de contenido en CO_2 de la atmósfera del invernadero debe ser superior a 300 ppm y no rebasar las 600 ppm (www.infoagro.com, 2002).

1.5. VENTILACIÓN EN INVERNADEROS

El aire que rodea a las plantas es uno de los factores más importantes ya que éstas, como seres vivos que son, respiran y realizan sus funciones fisiológicas en función de esta actividad. Es por ello que la ventilación dentro de un invernadero es uno de los factores clave a controlar.

Si existe un correcto movimiento del aire, esto influye positivamente en el buen funcionamiento de la planta, pero si no existiese una correcta ventilación en un cultivo, se crearían zonas con diferencias de temperatura y humedad, lo cual se notaría lógicamente en un descenso de la producción de la explotación.

Los principales efectos de la ventilación sobre los factores climáticos son los siguientes (Cervantes, 2002ab):

- Efectos sobre la temperatura: La temperatura en el interior de un invernadero suele ser más elevada que la que hay en el exterior, por lo que al ventilar, se reduce la temperatura del invernadero. En caso de que se produjera "*inversión térmica*", es decir, el aire del interior del invernadero está a menor temperatura que el aire exterior, se produciría una subida de la temperatura provocada por la ventilación. Este fenómeno es poco habitual. En condiciones normales, el aire caliente, al pesar menos que el frío, se concentra en la parte alta del invernadero y sale por las ventanas cenitales debido al "efecto chimenea". La velocidad del viento aumenta la tasa de renovación del aire.

- Efectos sobre la humedad: En el interior del invernadero la humedad absoluta es siempre superior a la del exterior. Ello se debe a que en el interior del invernadero existe una gran densidad de plantas que, por transpiración, elevan la humedad absoluta del interior. Con la ventilación se reduce la humedad dentro de un invernadero, con el menor riesgo de enfermedades para el cultivo.

- Efectos sobre la concentración de CO_2: La concentración de CO_2 en el exterior se mantiene más o menos constante alrededor de 300-350 ppm. En el interior del invernadero la concentración de CO_2 va variando a lo largo del día. Durante el día la planta realiza los procesos de fotosíntesis (en los que consume CO_2) y respiración (en los que produce CO_2). Pero el proceso de fotosíntesis es más importante que el de respiración, por lo que la planta durante el día es consumidora neta de CO_2. Durante la noche la planta sólo respira, por ello, durante la noche la planta es una generadora de CO_2.

  Desde que anochece empieza a aumentar la concentración de CO_2 en el interior del invernadero. Si se mantienen las ventanas cerradas, la máxima concentración de CO_2 se suele dar justo antes de que amanezca. La concentración de CO_2 va bajando cuando la planta realiza la fotosíntesis; cuanto mejores sean las condiciones climáticas, mayor será la tasa de fotosíntesis y por ello mayor será el consumo de CO_2. Llega un momento en que la concentración de CO_2 es inferior en el interior que en el exterior del invernadero.

A partir de este momento es cuando sería conveniente ventilar. Mantener las ventanas cerradas de noche nos permite acumular CO_2, que será usado a lo largo del resto del día. Al atardecer, dentro de un invernadero cerrado, bajan las temperaturas, el aire suelta el vapor de agua retenido que se condensa en la capa interior de la cubierta y sobre las plantas. Por ello el invernadero retiene más el calor. Por la mañana, si se retrasa la apertura y ventilación del invernadero, el agua condensada gotea sobre el cultivo facilitando la aparición de enfermedades, por lo que se debe iniciar la ventilación antes de que esto ocurra (Sanz *et al.*, 2001).

La ventilación de los invernaderos se suele realizar, o bien mediante el uso de aperturas localizadas en el techo o en los laterales del invernadero, que permiten la renovación del aire, o bien mediante el uso de ventiladores de diferentes caudales (Cervantes, 2002ab). La mejor forma de clasificar las ventilaciones es basándose en la forma en que se realiza la renovación del aire.

La ventilación pasiva es aquella en la que se utilizan aperturas o ventanas en el invernadero, y el viento y las diferencias de presión van renovando el aire. Por el contrario, la ventilación activa es aquella en la cual se actúa sobre el movimiento del aire dentro del invernadero, mediante el uso de ventiladores.

La ventilación pasiva se puede dividir a su vez, según el lugar de colocación de las ventanas, en:

- Ventilación lateral: Las ventanas se sitúan en los laterales o paredes del invernadero.

- Ventilación cenital: Las ventanas se sitúan en el techo del invernadero. La ventilación cenital es más efectiva que la lateral. De hecho, se admite que una ventana cenital de una determinada superficie resulta, a efectos de aireación, hasta 8 veces más efectiva que otra de igual superficie situada lateralmente.

Normalmente las ventanas deben ocupar entre un 18 y 22% de la superficie de los invernaderos, teniendo en cuenta que con anchuras superiores a los 20 m será imprescindible disponer de ventilación cenital que mejore la aireación lateral. La apertura y cierre de las ventanas suele hacerse mecánicamente a través de un sistema de cremalleras, accionado eléctricamente por un termostato, aunque también puede hacerse manualmente (www.infoagro.com, 2003b).

La ventilación debe ser un proceso progresivo. No conviene pasar de un invernadero totalmente cerrado a un invernadero totalmente abierto (Sanz *et al.*, 2001).

Tradicionalmente, en los invernaderos se ha utilizado la ventilación pasiva o natural, ya que su coste era inferior a la ventilación activa o forzada. Pero hoy día, esto está cambiando por varias razones:

- El accionamiento de las ventanas depende del viento. Con velocidades muy altas de viento hay que cerrar las ventanas, incluso en verano, lo que se traduce en unas temperaturas muy elevadas. En cambio, el uso de ventiladores no depende del viento.

- Las ventanas laterales son una importante entrada de patógenos. Por esto, cada vez se ven más mallas muy tupidas en las ventanas laterales para evitar la entrada de plagas, pero con dichas mallas se reduce la ventilación efectiva en el invernadero.

Estas circunstancias deben tenerse en cuenta a la hora de elegir el tipo de ventilación.

El objetivo de la ventilación forzada es sacar al exterior el exceso de temperatura y humedad. La velocidad y cantidad de calor que se deben sacar dependen fundamentalmente de la temperatura exterior y de la velocidad del aire. Es muy importante el dimensionamiento, la localización y el control de la ventilación para lograr una ventilación correcta (Cervantes, 2002ab). Los ventiladores de gran caudal tienen una serie de hélices de acero inoxidable. Lo normal es que sean extractores de aire. Manejan grandes caudales de aire a bajas velocidades, por lo que las plantas no se deshidratan. Todo el chasis del ventilador es de acero galvanizado para protegerlo de la corrosión. Existen algunos modelos que cuentan con las partes más delicadas cubiertas de plástico para evitar una oxidación prematura.

La hélice es también de acero inoxidable ya que a través de ella pasa todo el aire húmedo, productos químicos o cualquier otro agente corrosivo.

En la parte anterior del ventilador existen una serie de rejillas para evitar accidentes. En la parte posterior existen una serie de persianas o lamas, que se encuentran cerradas cuando el ventilador no está en marcha, con el objetivo de evitar la entrada de plagas y evitar pérdidas de temperatura.

La ventilación forzada pretende equiparar las condiciones que existen dentro del invernadero, a las condiciones que existen en el exterior de éste. Cuando amanece o anochece se producen acumulaciones de humedad dentro del invernadero, que se pueden evitar utilizando este tipo de ventilación. Estos ventiladores se utilizan en cualquier época del año; en épocas frías para evitar humedades excesivas dentro del invernadero y en épocas cálidas para evitar temperaturas excesivas.

El diseño y cálculo del número de ventiladores que debe tener un invernadero, está en función de la cantidad de aire que se quiera renovar, disposición de los aparatos, dimensión y planimetría del invernadero, distancias entre ventiladores, viento natural que exista en la zona en que se encuentre la finca, etc. La instalación debe estar bien diseñada ya que corregirla es bastante difícil. En función de la zona, existen invernaderos que colocan los ventiladores a más altura, así como hay otras zonas donde hay que ponerlos en la cara norte del invernadero.

1.6. CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS DURANTE PERIODOS FRÍOS

Existen distintos sistemas para calentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero (www.infoagro.com, 2003b):

- Empleo adecuado de los materiales de cubierta.
- Hermetismo del invernadero, evitando pérdidas de calor.
- Empleo de pantallas térmicas cuyo uso permite mantener entre 2 y 4ºC más en el interior del invernadero, con el consiguiente ahorro de energía.
- Dichas pantallas están justificadas en el caso de utilización de sistemas de calefacción.

- Condensación que evita la pérdida de radiación de longitud de onda larga, aunque tiene el inconveniente del goteo sobre la planta.
- Capas dobles de polietileno o de polipropileno, que se pueden emplear como pantalla térmica, con el inconveniente de pérdida de luminosidad en el interior. Se emplean en invernaderos sin calefacción.
- Invernaderos más voluminosos que producen mayor captación de la luz y al mismo tiempo mayor pérdida de calor por conducción. La mayor inercia térmica de volúmenes grandes permite un mejor control del clima.
- Propio follaje de las plantas, ya que almacenan radiación.
- Sistemas de calefacción por agua caliente o por aire caliente.

1.6.1. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

Si un invernadero no dispone de ningún sistema de calefacción, puede ocurrir que la temperatura de las plantas no alcance los objetivos de producción que se querían lograr. Para aportar calor a los cultivos en invernaderos existen diferentes opciones, tanto a la hora de elegir el combustible a utilizar como en los sistemas de distribución de este calor. Cada una de estas opciones tiene sus ventajas e inconvenientes, dependiendo del tamaño del invernadero, del tipo de cultivo, de la localización geográfica, etc (Oliveira *et al.*, 1999).

Las fuentes de energía para calefacción más utilizadas en invernaderos son el fueloil, el gasoil, el gas natural y el propano. El fueloil es el sistema más económico, pero está en desuso debido a la suciedad, humos y polución que genera. La elección entre el gasoil y el gas (sea natural o propano) depende del coste de ambos en la zona en cuestión y de las condiciones del suministro.

El gas puede llegar al invernadero a través de la red de tuberías de una compañía suministradora o almacenarse en un tanque en las inmediaciones del invernadero. A igualdad de coste, los combustibles gaseosos resultan más interesantes que el gasoil, ya que las calderas consiguen mejores rendimientos cuando se trabaja a carga variable y, sobre todo, porque los gases de escape pueden utilizarse para la fertilización carbónica del invernadero. En general, los gases de escape de la combustión del gasoil no pueden utilizarse para la fertilización carbónica, ya que contienen compuestos que resultan tóxicos para los cultivos.

En Holanda el gas es el combustible utilizado en prácticamente todos los invernaderos, debido a su coste competitivo y a la amplia red de distribución.

Además, en Holanda la calefacción se usa durante el día lo que permite obtener al mismo tiempo de la combustión diurna, calor y CO_2. En el sur de Europa, el gasoil es el combustible más utilizado, debido al menor alcance de la red de tuberías de gas (Oliveira *et al.*, 1999).

Existen fuentes alternativas de energía que se pueden utilizar. En Holanda se utiliza la cogeneración (generación de calor y electricidad simultáneamente) en invernaderos; el calor se aprovecha para el invernadero y la electricidad se vende a la red eléctrica. La energía geotérmica también es interesante para la calefacción de invernaderos en aquellas zonas en las que está disponible.

El calor generado en una caldera central de gas o gasoil puede distribuirse en forma de agua caliente o de aire caliente. En ocasiones, la distribución por agua se realiza a unidades que, alimentadas por agua caliente, emiten aire caliente, denominadas aerotermos. Determinadas calderas, habitualmente de gas, permiten la recuperación del

calor de los gases de escape, mediante un intercambiador, mejorando así la eficacia energética del sistema. Estas calderas se suelen denominar de alta eficiencia, con rendimientos energéticos próximos al 100%. La recuperación del calor, además, reduce la temperatura de los gases de escape y facilita su utilización para la fertilización carbónica (Oliveira *et al.*, 1999).



Figura 1.7. *Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Aerotermos.*



Figura 1.8. *Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Generador de aire caliente.*



Figura 1.9. *Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Generador de aire caliente con conexión de tubos de polietileno.*



Figura 1.10. *Sistema de calefacción del invernadero por medio de aire caliente. Distintas disposiciones del generador de aire caliente.*

Si la distribución de calor se realiza íntegramente en forma de agua caliente se pueden utilizar principalmente dos sistemas: tuberías de acero o tuberías de plástico. La distribución mediante tuberías de acero en el suelo y en el perímetro del invernadero es habitual en Holanda. Los tubos de acero en el suelo se utilizan además como raíles de transporte del producto en vagonetas empujadas por los operarios. Las tuberías de acero funcionan habitualmente con una temperatura de ida del agua de 90ºC y retorno a 70ºC.



Figura 1.11. *Caldera en la que se produce el agua caliente que se distribuye por las tuberías de plástico o metálicas que recorren la superficie del invernadero para su calefacción.*

La situación de las tuberías de calefacción en el suelo disminuye el consumo de energía, ya que el foco de calor se sitúa cerca de las plantas. Además, el calor emitido por radiación llega directamente a las plantas, mientras que el aire caliente tiende a subir, alejándose del entorno del cultivo.

Por estas razones el consumo de energía es inferior en invernaderos con tuberías de agua caliente respecto a los que utilizan aerotermos (Oliveira *et al.*, 1999).

La colocación de tuberías en el suelo se combina con tuberías en el perímetro del invernadero, donde los descensos de temperatura pueden ser mayores. La instalación por tuberías de acero resulta cara; una alternativa posible es la utilización de tuberías de aluminio.



Figura 1.12. *Sistema de calefacción por agua caliente a alta temperatura mediante tuberías metálicas.*



Figura 1.13. *Sistema de calefacción por agua caliente a baja temperatura mediante tuberías de plástico.*

Las tuberías de plástico suelen funcionar a baja temperatura, con ida a 45ºC y retorno a 35ºC. Además, el plástico (habitualmente polietileno reticulado, liso si va enterrado o corrugado si es aéreo) transmite peor el calor que el acero. En áreas donde las necesidades de calefacción son grandes, la utilización de tuberías de plástico no resulta práctica por la gran cantidad de tubería que se debe utilizar. Sin embargo, en zonas donde se tienen menores necesidades de calefacción, el empleo de tuberías de plástico es una alternativa a considerar. Su coste es algo superior al de los aerotermos pero el consumo de energía es menor (Oliveira *et al.*, 1999).

Cuando el cultivo se realiza en mesas, las tuberías de calefacción se adosan a las mismas, de forma que queden lo más cerca posible del espacio a calentar, así se reduce el consumo energético del invernadero. Si se utiliza este sistema en combinación con aerotermos, el sistema que debe funcionar primero es la calefacción localizada, ya que su eficiencia es mayor; los aerotermos deben entrar en acción cuando la calefacción localizada no sea suficiente.

Otra técnica de calefacción localizada, usada en Holanda, es la utilización de tuberías de calefacción móviles, que se van elevando a medida que el punto de crecimiento del cultivo toma altura. Cuando el cultivo se realiza en sustrato, el calor se puede aplicar con tuberías de plástico colocadas debajo del sustrato, con tubería corrugada de polietileno reticulado. Este tipo de tuberías de plástico también se utilizan para calefacción de mesas, colocándolas sobre las mesas, por ejemplo sobre un soporte con ranuras para las tuberías (Oliveira *et al.*, 1999).

La instalación de aerotermos es una de las opciones más usadas en España para distribución del calor dentro del invernadero. Los aerotermos son equipos que, alimentados por agua caliente, distribuyen aire caliente. Constan de un intercambiador de calor formado por una red de tubos con aletas y un ventilador. El ventilador impulsa el aire ambiente del invernadero a través de la red de tubos, donde el aire se calienta. A veces también se denominan aerotermos a equipos alimentados por electricidad que generan aire caliente.

Los aerotermos clásicos funcionan con agua caliente entre 60ºC y 100ºC; actualmente se encuentran en el mercado equipos que funcionan con temperaturas más bajas (Oliveira *et al.*, 1999).

Son una opción de coste competitivo que no ocupa espacio en el suelo ya que suelen colocarse colgados de la estructura. Una de las ventajas de los aerotermos para determinados tipos de cultivos es que éstos producen una disminución de la humedad relativa del aire en el invernadero, respecto a la que se produce con tuberías de agua caliente. La desventaja de estos equipos es que el aire caliente tiende a subir, por lo que parte del calor generado se pierde en zonas de poco interés. Es por esto por lo que los aerotermos se diseñan con potencias superiores a las utilizadas con tuberías de agua caliente, y su consumo energético es mayor. El control de estos equipos suele ser todo/nada, comandado por un termostato.

Cuando un aerotermo protege secciones grandes del invernadero (20-30 m) se puede distribuir el aire caliente con tuberías de plástico flexible, de diámetro ente 40 y 60 cm, agujereadas regularmente.

Estas tuberías, que se colocan a cierta altura, mejoran la uniformidad de la distribución del calor. En ocasiones, los primeros tramos de las tuberías son de chapa galvanizada, en los puntos en los que los caudales y velocidad del aire son mayores, para evitar roturas en el plástico. Una alternativa a la utilización de aerotermos es la instalación de generadores que, alimentados por gas o gasoil, realizan la combustión y emiten aire caliente, incluyendo a veces los gases de escape. De esta manera, se puede proporcionar al mismo tiempo calefacción y fertilización carbónica.

Los sistemas de calefacción suelen combinarse con técnicas de ahorro energético; la pantalla térmica es uno de los sistemas más utilizados en este sentido (Oliveira *et al.*, 1999).

1.7. EMPLEO DE PANTALLAS TÉRMICAS

Se puede definir una pantalla como un elemento que extendido a modo de cubierta sobre los cultivos tiene como principal función ser capaz de variar el balance radiativo tanto desde el punto de vista fotosintético como calorífico. El uso de pantallas térmicas consigue incrementos productivos de hasta un 30%, gracias a la capacidad de gestionar el calor recogido durante el día y esparcirlo y mantenerlo durante la noche, periodo en el que las temperaturas bajan sobremanera en los invernaderos del sureste español.

Las pantallas también son útiles como doble cubierta que impide el goteo directo de la condensación de agua sobre las plantas en épocas de excesiva humedad (www.infoagro.com, 2003b).

De esta forma, las pantallas térmicas se pueden emplear para distintos fines:

- Protección exterior contra:
    - El exceso de radiación con acción directa sobre las plantas, quemaduras.

- El exceso de temperatura.
- Secundariamente, viento, granizo, pájaros.

- Protección interior:
  - Protección térmica, ahorro energético.
  - Contra el enfriamiento convectivo del aire a través de la cubierta.
  - Secundariamente, regulando la humedad ambiental y contra la condensación.

Por lo general una pantalla térmica consiste en una malla formada por hilos de polietileno entrelazados con fibras de aluminio, en diferentes proporciones. En las regiones mediterráneas han tenido un gran éxito debido a su doble función en invierno y en verano, lo que aumenta su rentabilidad. En invierno se recogen de día y se extienden de noche para evitar la pérdida de radiación infrarroja, que la pantalla térmica devuelve al interior del invernadero. En verano se recogen de noche y se extienden de día, para sombrear el invernadero reflejando parte de la radiación visible.

En general, su apertura y cierre está automatizado mediante unos pequeños motores que tiran de un cierto número de hilos; la pantalla, dividida en secciones de unos cinco metro de largo y algunas decenas de metros de ancho, se abre y cierra impulsada por los motores (Oliveira *et al.*, 1999).

1.8. AUTOMATIZACIÓN DE INVERNADEROS

El manejo de la tecnología en el invernadero obliga a conocer los conceptos básicos de control de automatismos. Los invernaderos más sencillos también tienen sistemas sencillos de control automático cuando el control no es simplemente manual. Determinados actuadores pueden estar controlados con un termostato. Invernaderos más sofisticados pueden incorporar un controlador o un autómata programable conectado a un número superior de sensores, o incluso pueden contar con un ordenador. El control puede realizarse entonces por varios métodos, desde el más sencillo al más sofisticado (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

De una forma simplificada, se pueden definir cinco niveles en los cuales se puede situar la automatización de un invernadero (Benavente *et al.*, 2000ab):

- *Nivel cero*: *Sin control automático*. Las operaciones se realizan de forma manual. Esto es habitual en muchos invernaderos cuyo equipamiento de climatización se reduce a la apertura y cierre manual de las ventanas.
- *Nivel uno*: *Control horario.* Las operaciones se realizan de forma automática a la hora marcada por el usuario. La información se transmite, en general, de forma eléctrica desde los contactos o relés de salida del automatismo a electroválvulas, relés exteriores o contactores, que arrancan y paran el equipo correspondiente. En este nivel no se tienen en cuenta las variables climáticas.
- *Nivel dos*: *Control por termostatos y automatismos similares*. Las operaciones se realizan en función de una variable climática, con un valor de consigna, y en general con diferencial o solapamiento en la actuación. La actuación se transmite, como en el caso anterior, desde un relé de salida del termostato a un

relé exterior o un contactor, y al equipo correspondiente. La actuación depende de una sola variable climática, en general, la temperatura.

- *Nivel tres*: *Control por autómatas programables (PLC) o controladores análogos.* El autómata posee una inteligencia centralizada que recibe la información desde el invernadero (a través de las entradas del autómata) y opera sobre los actuadores (a través de las salidas). Suele haber un número elevado de salidas; en muchos casos el número de entradas y salidas, analógicas o digitales, es prácticamente ilimitado, puesto que se pueden ampliar. Las salidas envían la actuación correspondiente a los equipos a través de relés y contactores. En este caso, se pueden realizar programas complejos de actuación, que pueden depender a la vez de varios parámetros climáticos y de un horario.
- *Nivel cuatro*: *Control distribuido.* En este caso existe habitualmente un ordenador central conectado a una serie de controladores o autómatas, colocados en cada sector. Desde el ordenador central se visualiza y almacena la información y se pueden enviar órdenes a los distintos sectores.

La automatización puede realizarse, como ya se ha comentado anteriormente, con distintos niveles de tecnología. En invernaderos sencillos puede realizarse con temporizadores o programadores. En invernaderos con equipamientos más sofisticados puede realizarse con miniautómatas, autómatas y/u ordenadores (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

Los autómatas programables son aparatos equipados con uno o varios microprocesadores que, a partir de la información proporcionada por un cierto número de señales de entrada (conectadas a pulsadores o sensores), gestionan, de acuerdo con su

programación, el estado de un cierto número de salidas que están conectadas a los actuadores del sistema (en el caso de los invernaderos, calefactores, electroválvulas, sistemas de refrigeración, etc). Son equipos robustos y resistentes diseñados para funcionar en ambientes industriales y equipados con una memoria limitada.

Los ordenadores personales también pueden utilizarse en automatización. Frente a los autómatas programables, presentan la ventaja de tener mayor capacidad de almacenamiento de datos (según la capacidad del disco duro) y su mayor facilidad y versatilidad para la comunicación con el usuario y visualización de datos y actuaciones. Sus desventajas son su menor robustez y resistencia en ambientes agresivos (el ambiente del invernadero es una atmósfera húmeda con tratamientos químicos a intervalos regulares) y su menor garantía de funcionamiento; el ordenador puede incluso llegar a bloquearse ante determinadas situaciones.

Tal y como se comentó anteriormente, en muchas instalaciones se utiliza el control distribuido, de forma que en cada módulo o subunidad se colocaría un autómata para el control independiente de ese módulo.

Además de los autómatas, desde un ordenador central se recogería la información de todos los módulos para la visualización de la información, la comunicación con el usuario y la toma de decisiones estratégicas.

De esta forma toda la información podría visualizarse en un solo punto, el ordenador, pero si el ordenador central fallase, todos los autómatas continuarían gestionando sus respectivos módulos (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

1.9. INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Los elementos de control automático son tecnologías de tipo eléctrico y electrónico. Por ello, es necesario conocer los fundamentos de la tecnología eléctrica y electrónica para poder comprender cómo funciona la automatización de una instalación. Además, un buen número de los actuadores de un invernadero (motores de bombeo, apertura de ventanas) suelen ser eléctricos (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

Los invernaderos deben considerarse locales mojados, según la clasificación que establece el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, ya que los suelos, techos y paredes pueden estar impregnados de humedad y suelen aparecer, aunque sea temporalmente, gotas gruesas de agua debido a la condensación.

Además, en cualquier invernadero se puede instalar en un momento dado un sistema de nebulización, con lo cual todos lo equipos eléctricos que están en el interior van a sufrir las consecuencias de la humedad existente.

Los tratamientos con productos químicos potencialmente corrosivos (insecticidas, fungicidas) son frecuentes, lo que influye en el grado de protección o IP que deben tener los equipos eléctricos (Benavente *et al.*, 2001c).

Otro aspecto particular a considerar en invernaderos, es que las temperaturas pueden llegar a ser muy elevadas (por ejemplo hasta 50ºC en verano sin cultivo); esto obliga a que las canalizaciones soporten estas temperaturas. Los tubos de PVC, habituales en las canalizaciones de instalaciones industriales suelen deformarse con estos niveles de temperatura, por lo que se recomienda utilizar bandejas tipo rejilla metálica con cables multipolares fijados sobre la rejilla.

Un tipo adecuado es el cable de cobre con aislamiento de etilieno-propileno y cubierta de PVC, flexible y resistente a la humedad. Es necesario que las bandejas estén puestas a tierra (Benavente *et al.*, 2001c).

1.10. INSTRUMENTACIÓN Y SENSORES

Los sensores proporcionan la información para la automatización de los sistemas. En invernaderos son habituales los sensores de temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento, radiación solar, lluvia, pH y conductividad. Pueden aparecer también sensores de otro tipo, como sensores de humedad de suelo o de velocidad de viento en el interior del invernadero. Cada sensor funciona debido a determinadas propiedades físicas y envía una determinada señal proporcional a la magnitud que mide. Acompañando a los sensores aparecen los instrumentos de multiplexión y digitalización de señales.

Finalmente, existen aparatos específicos (los sistemas de adquisición de datos o dataloggers) para el almacenamiento de la información enviada por los sensores (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

1.11. COSTES E INGRESOS DE CULTIVO EN INVERNADEROS

El poder utilizar todas estas tecnologías en un invernadero se traduce en unas ventajas que, al final deben convertirse en ingresos adicionales para la explotación (bien sea en forma directa o indirecta, como mano de obra, ahorros de energía, aumento de la producción o de la calidad del producto), pero lógicamente su instalación también conlleva un coste mayor.

Es por ello necesario hacer un estudio para cada invernadero en cuestión, evaluando los costes y contrapartidas que se obtienen para poder llegar así a la decisión más correcta.

Los tres factores básicos y determinantes para la elección de las áreas de producción en invernadero son: el coste de producción, su calidad y el coste del transporte (Nelson, 1985), para poder competir en los cada vez más globalizados mercados de destino.

Los dos primeros, el coste y la calidad de la producción dependerán de las condiciones climáticas locales, que determinarán tanto el nivel tecnológico de la inversión (exigencia de uso de invernaderos y equipos de climatización más o menos sofisticados) como su manejo.

Las posibilidades del transporte a larga distancia han evolucionado mucho en las últimas décadas, permitiendo que las áreas productoras, hoy día, se ubiquen lejos de los grandes centros de consumo, lo cual ha permitido el elevado desarrollo de los invernaderos en las áreas litorales más favorecidas climáticamente (Italia, Francia, España, Marruecos,…) de los países de la cuenca mediterránea (Castilla, 2007).

En cultivo bajo invernadero, cabe distinguir en Europa dos agrosistemas de producción:

- El agrosistema holandés o nórdico: Exige una gran inversión inicial (en estructura de invernaderos y equipos) y está caracterizado por un gran consumo de energía (ver *Fig*. 1.14)
- El agrosistema invernadero mediterráneo: Caracterizado por un nivel de inversión bajo y un menor consumo de energía (Ver *Fig.* 1.15).

Se podrían poner como ejemplos de distinta estructura de ingresos y costes un invernadero situado en Holanda y otro en Almería (Tecnología de invernaderos, UPM, 2002).

- El cultivo en Holanda es muy intensivo en medios. La inversión total en un invernadero (excluyendo el terreno) es de alrededor de 72 € m^{-2}. Las necesidades aproximadas de mano de obra son de 1 persona por 2.000 m^2; las de energía son de 360 kWh m^{-2} $año^{-1}$, y las de electricidad 6 kWh m^{-2} $año^{-1}$. Los costes directos varían entre 18 y 40 € m^{-2} y año; 5-7 € m^{-2} y año en mano de obra, 4-5 € m^{-2} y año en calefacción, 0.5-1,5 € m^{-2} en semillas y plántulas y 2-5 € m^{-2} en transporte. Los ingresos brutos en Holanda son de 27-55 € m^{-2} $año^{-1}$.

- Por el contrario, las mismas cifras para un invernadero hortícola en Almería serían muy distintas. La inversión total en un invernadero (excluyendo el terreno) sería de alrededor de 4-9 € m^{-2} para el parral almeriense. Los costes directos son muy inferiores a los de Holanda, entre 2-4 € m^{-2} y año; 0.5-2 € m^{-2} y año en mano de obra, nada en calefacción, 0.5-1 € m^{-2} en semillas y plántulas y alrededor de 0.5 € m^{-2} en transporte. Los ingresos brutos en Almería son 2-7 € m^{-2} $año^{-1}$.



Figura 1.14. *Invernadero multicapilla de cristal tipo Venlo típico del agrosistema holandés o nórdico.*



Figura 1.15. *Invernadero multitúnel de plástico flexible típico del agrosistema mediterráneo.*

En la siguiente tabla se muestran los costes medios de construcción y equipamiento de invernaderos mediterráneos dotados de ventilación lateral y cenital motorizada, en el sur de España.

Tabla 1.6. Costes medios de construcción y equipamiento de invernaderos mediterráneos dotados de ventilación lateral y cenital motorizadas, en el sur de España (sin incluir impuestos) incluyendo el montaje de lámina plástica (año 2007). Valores calculados para una superficie mínima de 1 ha. No incluye costes de ordenador de control climático y fertirrigación.

TIPO INVERNADERO	euros • m^{-2}
Invernadero parral mejorado (pendiente cubierta 27º/27º)	
Estructura	14.0
Ventiladores (desestratificación)	1.3
Nebulización (baja presión)	1.3
Calefacción (aire caliente)	3.0
TOTAL	**19.6**
Invernadero multitúnel curvo	
Estructura	19.0
Ventiladores (desestratificación)	1.3
Nebulización (alta presión)	2.8
Calefacción (tubo metálico) e inyección de CO_2	15.0
Pantalla mixta (térmica y de sombreo)	5.0
TOTAL	**43.1**

Fuente: Hernández et al., 2000; Castilla 2007.

La necesidad de mejorar la calidad, mediante un control climático adecuado, en los invernaderos mediterráneos implica un aumento de su nivel tecnológico, empleando invernaderos bien equipados.

Encontrar un compromiso económico entre las altas inversiones en invernaderos y equipos y sus prestaciones productivas requiere soluciones diversas, según las características técnicas y socioeconómicas locales, para conseguir una producción de calidad a nivel competitivo (Castilla, 2007).

Por lo tanto, para cualquier invernadero, en cualquier zona, la introducción de una nueva tecnología debe evaluarse teniendo muy en cuenta su estructura de ingresos y costes. Se tratará de ver si las ventajas conseguidas compensan o no el coste de su instalación, para decidir finalmente si resulta razonable implantar esa tecnología o no.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

- Comparar la influencia de distintos grados de apertura de la ventana cenital durante el periodo nocturno de 5-9h sobre la aparición de condensación en situaciones del invernadero con calefacción por medio de suelo radiante o por aerotermos.
- Realizar un análisis de varianza para distintas variables climáticas tales como temperatura interior a 1.5 m y a 3.2 m de altura, temperatura exterior, coeficiente global de pérdidas de calor, U y porcentaje de condensación media diaria producida.
- Estudiar la condensación producida con estrategias de calefacción por suelo radiante con distintos grados de apertura de la ventana cenital combinando la extensión o no de pantalla térmica.
- Analizar correlaciones entre distintas variables climáticas en los casos en que se produce condensación y en aquellos en los que no se produce. Obtener combinaciones de parámetros que presenten una elevada probabilidad de condensación.
- Formular distintas combinaciones de parámetros para la obtención de los modelos mediante análisis de regresión logística. Elegir los cuatro mejores modelos tanto en los casos con calefacción como en aquellos sin calefacción.
- Validar el mejor modelo para los datos de los periodos con y sin calefacción y analizar su aplicabilidad sobre conjuntos de datos climáticos heterogéneos.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. CALEFACCIÓN EN INVERNADEROS

Como se ha indicado anteriormente, el objetivo fundamental del cultivo protegido es modificar el entorno natural, mediante diversas técnicas, para alcanzar así una óptima productividad de los cultivos, aumentando las producciones, mejorando su calidad, alargando los periodos de recolección y extendiendo las áreas de producción (Wittwer *et al*., 1995).

Se persigue hacer un uso más eficiente del suelo, agua, energía, nutrientes y del espacio, así como de los recursos climáticos de radiación solar, temperatura, humedad ambiental y dióxido de carbono del aire (Wittwer *et al*., 1995).

Los objetivos principales del cultivo protegido son (Wittwer *et al*., 1995):

- Reducir las necesidades de agua.
- Proteger los cultivos de las bajas temperaturas.
- Reducir la velocidad del viento.
- Reducir daños de plagas, enfermedades malas hierbas, etc.
- Extender las áreas de producción y los ciclos de cultivo.
- Aumentar las producciones, mejorar la calidad y preservar los recursos.
- El control climático permite optimizar la productividad y calidad.
- Estabilizar los suministros de productos de alta calidad a los mercados.

Durante las noches de invierno, las temperaturas interiores del invernadero son ligeramente superiores a las del exterior, pero aún así es muy frecuente la necesidad de un sistema de calefacción para evitar que la temperatura del invernadero disminuya demasiado y baje por debajo de un umbral (Bailey, 1991).

En España, lo normal es que el clima generado en los invernaderos sin calefacción esté lejos del óptimo biológico de las especies cultivadas en su interior durante la mayor parte de los ciclos productivos. Si se alcanzan temperaturas por debajo de los 10ºC, puede darse una reducción considerable del crecimiento y desarrollo del cultivo (Mínguez, 1998):

- Reducción de la absorción de agua y nutrientes a través de la raíz.
- Reducción del transporte y distribución de asimilados.
- Disminución de la tasa de asimilación neta.
- Cambios anatómicos y morfológicos.

La temperatura del invernadero dependerá del balance de energía. Para limitar las temperaturas bajas hay que limitar las pérdidas de calor y favorecer los aportes de calor. Cuando los aportes naturales son insuficientes, se recurre a los artificiales mediante la calefacción (Castilla, 2007).

Los aportes de calor para elevar la temperatura del invernadero pueden efectuarse, según los objetivos, en la parte aérea del cultivo, en la parte radicular, o en las dos. En la calefacción de órganos aéreos el calor se transmite por convección o radiación, mientras que en la calefacción del suelo o sustrato la transmisión de calor se realiza por conducción (Castilla, 2007).

Lo que importa es la temperatura de las plantas, no del aire que las rodea. La temperatura de la superficie de las plantas resulta de sus intercambios de calor sensible, por convección con el aire, y por radiación con todas las superficies que le rodean, a los que hay que añadir los intercambios de calor latente por transpiración, principalmente de día, y, a veces, los de condensación de vapor de agua en forma de gotas sobre las hojas (Castilla, 2007).

Se han dado avances importantes en el modelado del comportamiento térmico del invernadero. Los efectos de la condensación son también muy importantes tanto desde el punto de vista del modelo teórico como desde el punto de vista práctico. Se han llevado a cabo investigaciones para estudiar los efectos térmicos de la condensación sobre el cultivo, los efectos de la capacidad térmica y el valor de la calefacción del suelo. Algunos estudios se han centrado en la variación de la temperatura en altura del cultivo y entre el cultivo y el aire que le rodea, lo cual ha supuesto un gran avance (Critten *et al.*, 2002).

Se han realizado estudios con el objetivo de evaluar los factores que influían en la eficiencia energética de la calefacción de invernaderos, investigando los cambios en el coeficiente global de pérdidas, para estudiar cómo podían estos factores mejorar el control de la calefacción y para usar modelos climáticos que permitan analizar estrategias de control mejoradas (Perdigones *et al.*, 2006).

Se obtuvo una relación entre el coeficiente global U y la temperatura exterior mediante modelos de regresión, tanto para el caso de aerotermos como para suelo radiante. Este resultado también se observó en estudios anteriores (Basçetinçelik *et al.*, 1997).

En los experimentos en los que se aplicaba calefacción por medio de suelo radiante, existían diferencias significativas en los valores de U entre las distintas estrategias, por ejemplo entre aportar una potencia calorífica constante de 113.6 W m^{-2} y aportar esa misma potencia desde el inicio de la noche hasta las 07:00 h, los valores de U fueron inferiores en el segundo caso, alcanzándose en ambos casos la misma temperatura interior en el invernadero.

También se observaron diferencias significativas entre la estrategia que calentaba sólo durante la primera mitad de la noche y la estrategia que calentaba en la segunda mitad de la noche, siendo en el primer caso los valores de U menores, ya que la energía aportada en la segunda mitad de la noche puede resultar inútil en la mañana (Perdigones *et al.*, 2006).

Los resultados mostraron que existen cuatro factores que influyen en la eficiencia térmica, caracterizada por el coeficiente U: la velocidad del viento, un aporte de calor mayor, temperaturas exteriores mayores, la inercia térmica del invernadero y la capacidad térmica. Anteriormente se estudió la velocidad del aire, que influye en la infiltración de aire y en la transferencia de calor por convección desde las superficies de la cubierta y las paredes del invernadero (Bailey *et al.*, 1994).

Se utilizaron modelos dinámicos y con estos se obtuvieron distintos valores de U según se utilizara calefacción por aerotermos o por suelo radiante, ya que la temperatura del suelo desciende durante la noche con aerotermos y sin embargo se incrementa con suelo radiante. Esto hace que el calor acumulado en el suelo no se pierda a través de paredes y cubierta y los valores de U sean menores.

Como propuesta para ahorro energético en caso de calefacción por suelo radiante, para que la energía que se almacena en el suelo no se desperdicie, se propone una reducción del aporte de potencia calorífica en la última parte de la noche (Perdigones *et al.*, 2006).

Trigui *et al*. (2001) desarrolló un algoritmo para predecir las condiciones dinámicas del aire interior de un invernadero que optimizaba los beneficios netos para la producción de cultivo de tomate bajo invernadero. Los beneficios se calcularon como el valor del rendimiento del cultivo menos los costes energéticos para calefacción y deshumidificación así como los costes de inyección de CO_2. Las condiciones climáticas consideradas fueron el nivel de CO_2, la temperatura, humedad relativa y la radiación incidente. Estas condiciones se variaron dinámicamente para cada intervalo de tiempo a lo largo del periodo de cosecha.

El algoritmo constaba de dos subprogramas. Para consignas de los parámetros climáticos internos seleccionados, el primero calculaba el rendimiento del cultivo y el segundo calculaba los costes energéticos (calefacción y deshumidificación) con referencia a las condiciones de clima exterior predichas (radiación solar, temperatura, velocidad de viento y humedad relativa). Los costes de energía y de CO_2 se calcularon a partir de las ecuaciones de balance de energía y masa. Ambos algoritmos se utilizaron para predecir las consignas de los parámetros climáticos, ajustados para cada intervalo de tiempo a lo largo del periodo de cosecha, lo cual maximizará el valor diferencia entre el rendimiento del cultivo y los costes de energía (Trigui *et al.*, 2001, I).

Para la validación del modelo se midieron los parámetros físicos de un invernadero tipo Venlo de cristal situado en la ciudad de Québec (Canadá) para describir sus transferencias de masa (CO_2 y vapor de agua) y energía. Se utilizó el modelo para

predecir los beneficios netos en la producción de tomate durante 2 meses. Los valores medidos se compararon con los calculados mediante los submodelos (tasa de transpiración y rendimiento del tomate) y los consiguientes calculados por el modelo total. Este modelo al igual que los submodelos fue capaz de predecir el rendimiento del cultivo y los beneficios netos con una precisión de error igual al 3% para periodos de predicción de una semana o superiores. El modelo resultó especialmente sensible a los valores de temperatura exterior, afectando a los costes de calefacción pero no al rendimiento, y la radiación incidente reducía los costes de calefacción e incrementaba el rendimiento a través de la transpiración. Finalmente, la humedad relativa afectaba al rendimiento del cultivo y a los costes de deshumidificación. Se propuso mejorar la precisión del modelo incorporando el efecto de la radiación incidente en el cálculo de la tasa de transpiración (Trigui *et al.*, 2001, II).

Fernández y Rodríguez (2005) desarrollaron un modelo de calefacción por cable eléctrico en el caso de un sustrato de arena en invernadero con variaciones de temperatura del aire y ningún aporte artificial de calefacción. El modelo de elementos finitos obtuvo resultados similares en todos los puntos comparado con los datos experimentales, independientemente de los valores y métodos utilizados para la determinación de las propiedades térmicas del sustrato y de la introducción de las propiedades del sustrato basadas en la profundidad.

Sin embargo, cuando estaba presente alguna fuente de calor artificial (en este caso el sistema de calefacción) la precisión de la simulación dependía de varios factores.

La incorporación de la variación en la conductividad térmica efectiva como función de la temperatura produjo importantes mejoras en la simulación.

Esta conductividad térmica efectiva sufría grandes variaciones a altas temperaturas. Por lo tanto, el uso de valores constantes suponía una menor precisión en la simulación, principalmente cerca del cable calefactor, lo que significa en la zona de la raíz (Fernández *et al.*, 2005).

Los resultados de la simulación variaron dependiendo del método usado para determinar la conductividad térmica efectiva. El método de Campbell *et al.* (1994) mostró una mejor respuesta que el método de Vries (1963).

La consideración de la variación de las propiedades del sustrato en altura (compactación, humedad y presencia de una capa diferenciada en superficie) afectó a la precisión de la estimación de las propiedades térmicas del sustrato y, por lo tanto, a la precisión de los resultados de simulación (Fernández *et al.*, 2005).

Teniendo en cuenta todos estos factores, se obtuvo un modelo final basado en elementos finitos. En la validación del modelo con simulaciones de tres días se obtuvo un error cuadrático medio de 0.56ºC. Se obtuvo mayor precisión sobre el cable calefactor, a una profundidad de 150 mm (error de 0.23ºC). La precisión menor se obtuvo entre cables a 300 mm de profundidad, con un error de 0.87ºC (Fernández *et al.*, 2005).

La influencia del sistema de calefacción sobre el microclima del invernadero depende de varios parámetros. Por ejemplo, depende del método de calefacción, del flujo de agua en las tuberías, de la temperatura a la que circula este agua y del material de cubierta (Bartzanas *et al.*, 2005).

Se estudió la influencia del método de calefacción en un invernadero experimental tipo túnel con cultivo de tomate, durante el periodo nocturno.

El sistema de calefacción principal estaba formado por tuberías de agua caliente localizadas cerca del sustrato en crecimiento. También se investigó el uso de un aerotermo adicional como complemento y trabajando simultáneamente con el suelo radiante (Bartzanas *et al.,* 2005).

Con un sistema de calefacción por medio de suelo radiante y con una temperatura del agua que circula por las tuberías de calefacción de 65ºC, el sistema de tuberías tiene una salida media de 60 W m^{-2} y podría mantener un salto térmico entre interior y exterior de 10ºC, siendo la diferencia de presión de vapor de 0.42 kPa y la tasa de condensación en la cara interna de la cubierta de 3.42 mg m^{-2} s^{-1}. Si se quiere mantener el mismo salto térmico con el sistema combinado (aerotermos y suelo radiante), se tendría que tener una salida de 72 W m^{-2}. En este caso el déficit de presión de vapor medio sería de 0.56 kPa y la tasa de condensación en la cara interna de la cubierta sería de 0.5 mg m^{-2} s^{-1} (Bartzanas *et al.,* 2005).

Parece contradictorio que con el sistema combinado el cultivo tenga una mayor transpiración y, sin embargo, la tasa de condensación sea menor. Esto se debe a que el aire del invernadero se divide en dos zonas, una región ocupada por el cultivo y otra por encima del cultivo donde el aire caliente producido por el aerotermo hace que se forme un microclima muy diferente al formado en la parte inferior del invernadero y más cercana al cultivo (Bartzanas *et al.,* 2005).

El sistema de calefacción por agua caliente pudo mantener la consigna de temperatura deseada para una diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior de como mucho 10ºC. El cultivo estaba 0.77ºC más frío que el aire con calefacción

mediante tuberías de agua caliente y 1.57ºC más frío con el uso adicional del aerotermo. En ninguno de los casos se observó condensación sobre el cultivo (Bartzanas *et al.*, 2005). Debido a la corriente de aire caliente producida por el aerotermo, la diferencia de presión de vapor obtenida con el aerotermo fue más alta que la obtenida sólo con las tuberías de agua caliente.

La transpiración del cultivo fue mayor con el aerotermo debido a un mayor déficit de presión de vapor entre la hoja del cultivo y el aire y a la mayor conductancia aerodinámica del cultivo.

Con el sistema de calefacción combinado, la tasa de condensación en la cara interna de la cubierta se redujo fuertemente. Pero la adición del aerotermo produjo un incremento del consumo de energía de un 19% (Bartzanas *et al.*, 2005).

En otro caso se desarrolló un modelo para un sistema de calefacción de sustrato en cultivos bajo invernadero. El objetivo fue predecir la temperatura del sustrato y estimar el consumo energético. El modelo se validó experimentalmente en una instalación de calefacción del sustrato mediante cable eléctrico y aplicado a un cultivo de gerbera (*Gerbera jamesonii*) en el interior de un invernadero. Se examinaron diferentes configuraciones en el diseño y en los métodos de actuación de la calefacción eléctrica del sustrato durante un periodo de dos años (de la Plaza *et al.*, 1999).

En la instalación experimental, el uso de aislamiento térmico y acumuladores de calor produjo unos ahorros energéticos del 14 al 20%. Para la conservación de energía, la mejor localización para el cable eléctrico radiante fue enterrado bajo el sustrato a una profundidad de 0.2 m, y con aislamiento térmico y ladrillo resistente al calor por debajo del sustrato como un acumulador de calor.

La combinación que usó el acumulador de calor más el consumo energético sólo durante la noche, cuando la electricidad es más barata, produjo un ahorro total de costes del 27% (de la Plaza *et al.*, 1999).

Álvarez y Sobrón (1996) desarrollaron un modelo eficiente para estimar las distribuciones de temperaturas transitorias en el suelo, que se dan como resultado de una fuente de calor a una profundidad fija por debajo del invernadero. El modelo se desarrolló para usarlo como submodelo de los sistemas aire-suelo en invernaderos cuando el suelo se usa como un medio de acumulación de calor, con una red de tuberías enterradas actuando como un intercambiador de calor.

El modelo asumió que las propiedades térmicas del suelo eran constantes espacial y temporalmente y la transferencia de energía entre el invernadero y el suelo era principalmente resultado de la radiación neta y de la transferencia de calor sensible. En este estudio la fuente de calor se incluyó como un plano a una profundidad fija (Álvarez *et al.*, 1996).

Luo y Loomis (1992) presentaron un modelo que simulaba de forma realista la temperatura del suelo con una cubierta de cultivo y contenido de agua del suelo variable. El modelo se desarrolló de acuerdo con los principios de balance de energía y transferencia de calor en el suelo. El modelo predijo bien los flujos de energía en la superficie del suelo, la temperatura en la superficie del suelo, y la temperatura a varias alturas del cultivo.

En estos experimentos se observó que la cubierta vegetal y la humedad de la superficie del suelo influían enormemente sobre el balance de energía y la temperatura del suelo mientras que la variación de la porosidad del suelo y la conductividad térmica de éste tenían poco efecto sobre la temperatura del suelo (Luo *et al.,* 1992).

Kurpaska y Slipek (2000) realizaron una valoración de la eficiencia energética de dos sistemas de calefacción del sustrato en invernaderos: mediante tuberías enterradas y calefacción de la vegetación. Se pretendía obtener los valores óptimos de las siguientes variables de decisión: la profundidad y el espacio ocupado por los elementos de calefacción en el sustrato del suelo, así como la temperatura de la entrada de calefacción al sistema (para el sistema de tubería enterrada) y la temperatura de alimentación del agua y el espaciado entre elementos calefactores (para el sistema de calefacción de vegetación).

Se estudiaron las pérdidas de calor, diferencias de temperatura en el espacio de suelo observado y la eficiencia de calefacción necesaria de las tuberías definidas. El análisis mostró que para similares condiciones de temperatura del sustrato, el sistema de calefacción de la vegetación necesitaba una temperatura del agua 3ºC mayor que el sistema de tubería enterrada, y las pérdidas de calor fueron mayores en el sistema de calefacción de vegetación. Se definieron tanto la distribución de temperatura irregular en el sustrato como las pérdidas de calor para los valores óptimos de las variables de decisión en ambos sistemas (Kurpaska *et al.,* 2000).

Jaffrin y Bentounes (2003) centraron su estudio en los actuales vertederos de residuos sólidos urbanos que generan biogas. Éste se quema in situ para destruir los contaminantes nocivos y por otra parte se extrae el agua producida.

Sin embargo, el biogas podría ser alternativamente un combustible barato para la calefacción en invierno y podría aportar a los invernaderos abundante cantidad de CO_2 para aumentar el crecimiento del cultivo a lo largo del año.

Se ensayaron dos cultivos de rosas sin suelo, cultivadas bajo dos invernaderos idénticos de plástico de 300 m^2, uno equipado con inyección de gases de escape y el otro mantenido bajo una atmósfera convencional, siendo este caso el control o referencia (Jaffrin *et al.*, 2003).

Se compararon durante 24 meses los rendimientos de cultivo y la calidad de la rosa cortada y se observó que la mayor productividad del cultivo producida en los casos en los que se inyectaban los gases de escape, estaba relacionada también con una mayor contribución al rendimiento económico del invernadero, mucho mayor que la reducción en costes de calefacción producidos mediante el aprovechamiento y la combustión del biogas. Estos estudios subrayaron el potencial para los nuevos invernaderos hortícolas situados en las inmediaciones de vertederos modernos localizados en Francia y en cualquier otro país desarrollado (Jaffrin *et al.*, 2003).

3.2. VENTILACIÓN EN INVERNADEROS

El cerramiento con el material de cubierta y laterales del invernadero implica una gran reducción del viento respecto al exterior (Day *et al.,* 1999). Esta reducción del viento tiene una gran repercusión sobre la fisiología del cultivo y sobre el microclima del invernadero, debido al confinamiento del aire del recinto (efecto invernadero).

Un invernadero cerrado no es estanco ya que nunca se consigue un hermetismo total. Los intercambios de aire con el exterior dependen mucho del viento exterior (Castilla, 2007).

La aireación de los invernaderos se justifica por tres necesidades (Castilla, 2007):

- Para evitar el calentamiento excesivo de día.
- Para asegurar unos niveles mínimos de CO_2.
- Para controlar la higrometría.

El movimiento del aire en invernadero, además de evitar la estratificación de temperaturas (mucho más acusada cuando se emplean sistemas de calefacción por aire caliente), tiene una gran importancia sobre el cultivo, afectando a la fotosíntesis, a la transpiración y al uso del agua y, por tanto, al crecimiento y a la producción. La ausencia de movimiento de aire es negativa para la productividad del cultivo.

La ventilación natural permite la renovación del aire caliente interior por aire fresco del exterior. Se consigue por medio de aperturas permanentes o temporales en el techo y en las paredes laterales y/o frontales del invernadero (Castilla, 2007).

La existencia de gradientes de temperatura es el origen de los movimientos convectivos. Cuando no hay viento, la tasa de renovación de aire depende de la diferencia de temperaturas entre interior y exterior (efecto térmico). En invernaderos mediterráneos, el efecto térmico tiene poca importancia si la velocidad del viento excede los 1.0 – 2.0 m s^{-1} (valores fácilmente alcanzados en costas mediterráneas). Quizás con el uso de mallas anti-insectos muy poco porosas gane importancia la ventilación por efecto térmico (Pérez-Parra *et al.*, 2002).

Como se ha indicado anteriormente, la ventilación del invernadero en invierno es necesaria para reducir la temperatura del invernadero, para controlar la humedad y mantener niveles de CO_2 adecuados. Sin una tasa de ventilación adecuada, el cultivo puede reducir la concentración de CO_2 hasta 100-200 ppm o menos, con lo que se reduce significativamente la tasa de fotosíntesis y, por tanto, el crecimiento de la planta. Por otro lado, altos niveles de humedad incrementan la condensación sobre superficies frías, reducen la transpiración de la planta (lo cual reduce la captación de agua y nutrientes) e incrementan el riesgo de enfermedades (Both, 2000).

En la década de los noventa, la ventilación recibió una especial atención realizándose diversos estudios sobre la efectividad de la ventilación y su efecto sobre el microclima interior del invernadero (Critten *et al.*, 2002).

Los estudios sobre ventilación están prácticamente limitados a estudios a sotavento. La ventilación por viento comprende dos partes que dependen respectivamente de la velocidad media del viento y de la turbulencia. La primera es normalmente la dominante salvo en situaciones de alta velocidad de viento.

Se han llevado a cabo estudios de la variación de los coeficientes de presión a lo largo de la longitud del invernadero como una función de la dirección del viento. A raíz de estos estudios, se proponen como trabajos posteriores la comprensión y predicción de los patrones de distribución de la luz en invernaderos mediante algún modelo que permita predecir la distribución de la radiación en invernaderos multitúnel con techos curvos (Critten *et al.,* 2002).

En cuanto al estudio térmico, el uso del método de elementos finitos permite realizar análisis incluyendo las siguientes variables de estado entre otras: temperatura, humedad, velocidad del aire, cambios de calor latente y condensación. Además, las pantallas térmicas pueden incluirse también en el modelo (Critten *et al.*, 2002).

La comprensión de los procesos físicos que conducen la ventilación natural no ha alcanzado el estado en donde las tasas de ventilación de aire pueden predecirse para los invernaderos utilizados en horticultura comercial. Esta información se hace necesaria para la implementación de un sistema de control climático económicamente óptimo y que permita reducir los estados de estrés de las plantas en verano, mejorando la calidad del producto. Se tiene poca información en el estudio del conjunto de los intercambios de masas y energía entre el cultivo y el aire de ventilación. La influencia de la posición de las ventanas en la creación de flujos secundarios y regiones con poco movimiento de aire no se ha estudiado en profundidad, a pesar de que tiene importantes efectos en la uniformidad del clima del invernadero (Critten *et al.,* 2002).

Estudios realizados por Baptista, Bailey y Meneses (2001) confirmaron que la ventilación es una de las herramientas más importantes para controlar el clima del invernadero.

La ventilación es el resultado de la acción de dos fuerzas naturales, el viento y la flotabilidad térmica. Se describieron varios modelos de ventilación natural. Para determinar las tasas de ventilación se usaron varias técnicas como gas trazador y balances de energía. El balance de energía se basa en la energía retirada del invernadero mediante ventilación como método de prevención frente a temperaturas excesivamente altas. Las técnicas de gas trazador se basan en balances de masa y se usan principalmente para medir directamente las tasas de ventilación en el invernadero. Parece que con tasas de ventilación bajas, la técnica del gas trazador dio mayor precisión que el balance de energía. La dificultad de usar el balance de energía está en el gran número de variables implicadas y la precisión que se requiere en su determinación. El modelo basado en el viento y las fuerzas de flotabilidad dio mejores resultados que el método de balance de energía (Baptista *et al.,* 2001).

Las tasas de ventilación y fugas se analizaron como funciones de la velocidad del viento, la dirección de viento y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero. El modelo basado en el efecto combinado del viento y el salto térmico dio buenas predicciones de las tasas de ventilación y puede usarse para estimar con precisión las aperturas de ventanas. El modelo basado en el viento y las fuerzas de flotabilidad térmica (*buoyancy*) dio mejores resultados que el método de balance de energía. (Baptista *et al.,* 2001).

Después de estudios preliminares que demostraran que la humedad del aire en un invernadero se incrementaba considerablemente cerca de la superficie foliar más baja, particularmente durante el día cuando la transpiración del cultivo era máxima, Boulard

y Fatnassi (2004) se centraron en las consecuencias de la ventilación de invernaderos sobre el desajuste entre el clima exterior y el interior y entre este último y el clima en la cercanía de las hojas.

La humedad del aire interior dependía en gran medida de la ventilación del invernadero. La humedad del aire interior se incrementó un 18% y un 13%, respectivamente para periodos de día y noche, en el centro de un túnel con ventilación normal. En el centro de un túnel ampliamente ventilado la humedad relativa se incrementó un 11 y un 4% respectivamente, y en el túnel ampliamente ventilado, medida cerca de la apertura de ventilación, la humedad registrada sólo se incrementó un 8 y un 3% respectivamente para periodos de día y noche (Boulard *et al.*, 2004).

Las diferencias de temperatura entre la capa límite de las hojas y el volumen de aire interior o exterior se vieron poco afectadas por la velocidad de aire excepto durante los periodos nocturnos, en los que las inversiones térmicas podían verse agravadas por una baja ventilación del invernadero. Se mostró que la velocidad de aire interior era también mucho mayor en el área situada cerca de las ventanas que en el centro del invernadero y, por lo tanto, los climas interior y de capa límite de las hojas en estas áreas estaban más acoplados a las condiciones exteriores (Boulard *et al.*, 2004).

Roy y Boulard (2002) utilizaron dos modelos semi-empíricos para determinar la transferencia de calor y transferencias de ventilación en invernaderos. Las técnicas de medida asociadas a estas aproximaciones fueron también bastante sencillas: se midieron temperaturas en el primer caso, y temperatura y humedad del aire junto con tasa de intercambio perteneciente al volumen del invernadero completo en el segundo caso.

El objetivo principal fue el de ser capaces de explotar estos modelos para mejorar el diseño del invernadero y los mecanismos de control (Martin-Clouaire *et al.*, 1996), o para obtener algoritmos de control más eficientes (Bailey & Chalabi, 1994; Ferentino *et al.*, 2000) o estrategias de climatización (Tchamitchian et al., 1997).

Se es consciente de que todavía hay una necesidad de investigaciones futuras en la micrometeorología del invernadero para permitir, por ejemplo, descripciones más realistas de la complejidad del clima dentro del invernadero y a nivel del cultivo (Roy *et al.*, 2002).

Nielsen (2002) destacó que la ventilación es un proceso físico importante que influye en el clima interior del invernadero. Normalmente se utiliza para el control de la temperatura, humedad y concentración de gases, como CO_2. Una utilización eficiente de la ventilación es característica crucial para el invernadero en periodos de verano con altas temperaturas. En dichos periodos veraniegos, el problema es controlar la temperatura del aire alrededor de la planta.

En el verano, las ventanas están totalmente abiertas y la temperatura del aire del invernadero es demasiado alta. El intercambio del aire en la zona de la planta es muy pequeño. Especialmente esto es un problema en invernaderos modernos con sólo ventilación cenital. El aire pasa a través de las ventanas en la zona superior del invernadero sin ningún efecto sobre el aire que rodea al cultivo. En este experimento se colocó una pantalla vertical de 1 m de altura situada en la parte alta del invernadero, paralela al caballete. Con esto se consiguió una mejora de casi un 50% de media en el intercambio de aire alrededor del cultivo. Se redujo la temperatura media del aire en 2.1ºC.

Boulard y Kittas (2002) analizaron diferentes simulaciones del clima de invernaderos. Destacaron el incremento producido en la complejidad en las simulaciones del clima de invernaderos, desde la primera simulación con un modelo a escala y confinado de invernadero (Nara, 1979) hasta los estudios más recientes de Fatnassi *et al*. (2001b) y Reichrath y Davies (2001) relativos a invernaderos multitúnel de una hectárea o más. También se ha mejorado el nivel de realismo, los primeros estudios tenían en cuenta sólo invernaderos vacíos, mientras que las simulaciones más recientes consideran la acción dinámica del cultivo en el flujo y los consiguientes intercambios de energía y masa.

De forma similar, el efecto de varios elementos estructurales tales como ventanas (Lee & Short, 2000) y diferentes mallas anti-insectos sobre el flujo (Teitel & Schlykar, 1998) y en el clima interior (Fatnassi *et al.*, 2001b), se han tenido en cuenta en los primeros estudios paramétricos.

Considerando las necesidades específicas de cada tipo de planta y otros agentes bióticos, será posible controlar el clima al nivel de la planta con una mayor economía de medios, materia y energía y una mucha mejor eficiencia.

La instalación de mallas plásticas en las aperturas de ventilación en invernaderos es la técnica de exclusión de insectos que más se ha extendido en los últimos años. La principal ventaja de la utilización de estas mallas es la de una menor incidencia de enfermedades y la posibilidad de reducir el número de tratamientos fitosanitarios. Las mallas anti-insectos también evitan la salida al exterior de los insectos polinizadores y de los insectos empleados en control biológico.

La gran limitación de estas mallas está relacionada con la reducción que provocan en la superficie destinada a la ventilación del invernadero. Esta reducción tiene una relación inversa con la porosidad del tejido.

El estudio de la geometría de la malla y el análisis de su comportamiento aerodinámico son los puntos esenciales para determinar su potencial excluyente y la resistencia que ofrecen estos textiles al flujo de aire, relacionada con la tasa de renovación. En relación a este último punto, se realizaron ensayos en túnel de viento que determinaban la caída de presión que la presencia de la malla provocaba en el flujo de aire en función de su velocidad (Álvarez *et al.*, 2005).

Fatnassi et al. (2004) desarrolló un modelo basado en los balances de masa y de calor del cultivo permitiendo calcular la temperatura interior y la humedad junto con la temperatura en la zona del cultivo. Este modelo resultó válido para un cultivo maduro sin estrés con bajas diferencias entre temperatura interior y exterior. Puede utilizarse numéricamente para identificar la función de ventilación del invernadero junto con el parámetro de acumulación de calor del suelo, mediante el ajuste de datos calculados y medidos de temperatura del cultivo, del aire interior y de la humedad y con la deducción de la tasa de transpiración del cultivo. El modelo se probó en un invernadero ventilado en condiciones de verano con una superficie de apertura pequeña (6%) y en otro invernadero grande con mayor superficie de ventilación (18%).

Las medidas se tomaron cuando el cultivo de tomate estaba maduro. Basado en las medidas experimentales, se determinaron los coeficientes de eficiencia de la ventilación y se utilizaron para validar el modelo. Con respecto a las medidas del aire interior se

obtuvo un buen ajuste entre datos experimentales y datos obtenidos con el modelo tanto para los valores de los coeficientes de ventilación como para la velocidad del aire interior.

Con ello se mostró que es posible hacer una estimación precisa de la ventilación y de las tasas de transpiración mediante dispositivos de medida simples, tales como sensores de temperatura y humedad del aire.

El uso de CFD para mejorar el sistema invernadero-cultivo está todavía comenzando. Combinado con otras aproximaciones, tales como el uso de soluciones analíticas sencillas para la exploración de los gradientes climáticos en la capa límite de las hojas, llevará a mejoras significativas en el diseño de invernaderos y en las estrategias de control climático (Boulard *et a.*, 2002).

En estudios de modelos a escala, Roy *et al.* (2000b), mostró que la presencia de un cultivo alto, como el tomate maduro, no cambiaba el modelo de flujo pero reducía la turbulencia del flujo. El cultivo hacía el papel de un medio poroso que generaba una caída de presión distribuida en el volumen del invernadero.

Existen pocos datos, la mayoría en invernaderos cerrados, sobre los intercambios de vapor de agua y energía entre cultivos y el aire del invernadero. Recientemente, Kempes *et al.* (2000) ha descrito el efecto de la posición del sistema de calefacción sobre la distribución vertical de temperatura y la transpiración del cultivo. En invernaderos cerrados con pimiento maduro, en condiciones diurnas, Zhao *et al.* (2001) observó fuertes gradientes de temperatura y humedad del aire inducidas por la intercepción de la radiación solar por las plantas (Boulard *et a.*, 2002).

Estos gradientes se reducían cuando el invernadero se refrigeraba al abrirse las ventanas cenitales. Cuando ambas ventanas, lateral y cenital, estaban abiertas, los gradientes de temperatura y humedad fueron mayores que cuando sólo estaban abiertas las ventanas cenitales y cuando las plantas fueron pequeñas, estos gradientes resultaron insignificantes (Boulard *et a.*, 2002).

Fatnassi y Boulard (2002) estudiaron un invernadero grande de unos 5.600 m^2 en condiciones de producción. La medida de la actuación de la ventilación fue posible mediante un gas trazador (N_2O). El análisis de los datos experimentales estableció que:

- Para una dirección de viento determinada (paralelo o perpendicular a la ventana), la tasa de ventilación del invernadero aumenta linealmente con la velocidad del viento y con el grado de apertura.
- El coeficiente global de efecto del viento sobre la ventilación es 1.4 veces mayor cuando el viento es normal a las ventanas laterales que para un viento con dirección paralela a ellas.
- La contribución del efecto chimenea a la ventilación puede ser despreciado cuando la velocidad de viento es superior a 2 m s^{-1}.
- El uso de mallas anti-insectos provoca una caída de presión adicional a través de la ventana que reduce la ventilación del invernadero y aumenta significativamente la temperatura del aire del invernadero.
- Puede estimarse el incremento del área de apertura que permite mantener una temperatura del aire constante.

Confirmando resultados comentados anteriormente, Pérez Parra y Baeza (2004) realizaron estudios de ventilación en invernaderos tipo parral y resaltaron que la

ventilación natural se producía por dos fenómenos físicos conocidos como el efecto chimenea y los efectos del viento.

El efecto chimenea se debe a la flotabilidad térmica resultante de la diferencia entre la temperatura interior y la exterior, que crea una distribución de presión entre y sobre las ventanas en dirección vertical.

La componente media de la velocidad del aire crea una distribución tridimensional de la presión estática sobre la superficie del invernadero y la turbulencia del viento crea un campo de presión fluctuante. El campo de presión estática media produce un flujo de aire entre las ventanas en aquellas regiones con alta y baja presión, mientras que la turbulencia produce fluctuaciones en el flujo en cada ventana (Pérez Parra *et al.*, 2004).

Anteriormente se habían propuesto métodos para calcular la ventilación debida al efecto chimenea y a la velocidad de viento (Boulard & Baille, 1995). Éstos propusieron un modelo de ventilación con ventanas abatibles o bien cenitales o bien laterales. Otros autores propusieron modelos para invernaderos con ventilación cenital y lateral (Kittas *et al.*, 1997).

Pérez Parra y Baeza (2004) realizaron medidas de ventilación natural en un invernadero tipo parral, ampliamente usado en el sur de España. Este invernadero disponía de ventanas en cada lado de la cubierta, cerca de la cumbrera, así como de ventanas laterales en ambos lados. Éstas se abrían enrollando el film de plástico que las cubría.

La eficiencia de las distintas combinaciones de ventilación fue la siguiente:

- Ventana abatible de cara al viento (100%).
- Ventana abatible en la dirección del viento (67%).
- Ventana lateral enrollable (42%).

- Ventana cenital y lateral enrollables (37%).
- Ventana cenital enrollable (28%).

Un resultado curioso fue que la tasa de ventilación con la ventana cenital enrollable no se vio afectada por la dirección del viento, lo cual contrastaba con la respuesta de la ventana cenital abatible.

La ventilación aumentaba en función de la apertura de las ventanas abatibles, pero no de forma lineal. Además el incremento se iba haciendo más pequeño a medida que aumentaba en ángulo de apertura. La aproximación teórica para predecir las tasas de ventilación, basada en el efecto chimenea y en los efectos del viento, permitió modelar los datos experimentales y requirió sólo un parámetro, el coeficiente global de presión del viento, que podía ser determinado mediante el ajuste de los datos experimentales. Este parámetro se comparó con otros valores publicados comprobándose que dependía del sistema de ventilación (Pérez Parra *et al.*, 2004).

Tanny y Cohen (2003) llevaron a cabo medidas de campo para estudiar las tasas de ventilación y el microclima del cultivo en un invernadero comercial de pimiento con una pantalla de malla fina. Para determinar las tasas de ventilación se utilizó, con éxito, el balance másico de vapor de agua.

La tasa de ventilación aumentaba con la velocidad de aire y era mucho menor que la que se producía en un campo de cultivo no protegido de pimiento. Cerca de los límites del invernadero la ventilación era más sensible a la velocidad del viento que en la parte central. La región superior de la pantalla (justo debajo del techo) interaccionaba fuertemente con los alrededores. La mezcla producida en esta región estaba inducida

por la velocidad de viento, el esfuerzo cortante del viento y una estratificación térmica inestable a través de la pantalla (Tanny *et al.*, 2003).

Se comprobó que las tasas de intercambio de aire eran mayores en un invernadero apantallado que en un invernadero convencional de tamaño similar.

Durante las horas centrales del día, el clima interior del invernadero apantallado se caracterizó por una atmósfera estable, con la temperatura aumentando y la humedad absoluta disminuyendo a medida que aumentaba la altura. Esto, aparentemente, reducía la interacción con la atmósfera exterior (Tanny *et al.*, 2003).

Teitel y Tanny (2005) realizaron experimentos en invernaderos con ventilación cenital para estudiar las características del flujo de aire a través de las ventanas. En particular, los efectos de la velocidad de viento y el azimut en el flujo medio y turbulento a través de las diferentes regiones de la apertura vertical de las ventanas. En parte de los experimentos, se colocaron trampas para monitorizar la penetración y distribución de insectos en el invernadero.

Los modelos de flujo a través de las ventanas cenitales dependían de la dirección del viento con respecto al invernadero. En ventilación a sotavento, cuando el azimut del viento exterior estaba casi perpendicular al plano de apertura, la velocidad del aire en los dos bordes de las ventanas cenitales fue relativamente baja (Teitel *et al.*, 2005).

A velocidades de viento relativamente altas, las velocidades medias y turbulencia del aire a través de las ventanas, estaba escalado con la velocidad del viento. Por otra parte, cuando la velocidad del aire era relativamente baja, esta correlación era más débil y la contribución de las fuerzas de flotabilidad pareció incrementarse.

La dirección del vector de velocidad horizontal en la mitad de la amplitud de ventana cambió en el sentido antihorario con la rotación diurna en sentido horario del viento.

Cuando el viento soplaba desde detrás de las ventanas cenitales y perpendicularmente a ellas (ventilación a sotavento), la velocidad de aire en la mitad de la ventana estaba generalmente en dirección opuesta a la del viento exterior, resultando en un flujo entrante al nivel de esta región de las ventanas (Teitel *et al.,* 2005).

La entrada de insectos en el invernadero apareció asociada con el flujo de aire a través de las ventanas. En la apertura oriental se detectó una alta probabilidad de flujo entrante, lo cual produjo que quedaran atrapados un número de insectos relativamente grande en dicha región del invernadero (Teitel *et al.,* 2005).

Otros estudios relacionados con ventilación, como por ejemplo el realizado por Demrati y Boulard (2001), se centraron en el comportamiento de la ventilación y el microclima de un invernadero de 1 ha ocupado por banana en la región de Rabat (Marruecos). Normalmente las medidas de las tasas de renovación del aire se llevaron a cabo mediante gas trazador. Esto no está investigado correctamente para invernaderos grandes debido a sus dificultades de volumen y a los altos costes que supone este método. Los balances de energía y vapor de agua permitieron realizar una estimación de la ventilación a lo largo de un día.

Estos parámetros del modelo de ventilación fueron identificados posteriormente mediante el ajuste de esos datos con modelos de ventilación simplificados basados en el Teorema de Bernoulli. Se dedujeron los valores del coeficiente de pérdida de presión y el coeficiente de eficiencia de ventilación relacionada con el viento. Este último coeficiente resultó algo mayor (20%) en un invernadero grande de estas características que en un invernadero más pequeño.

Desde un punto de vista práctico el conocimiento preciso de la actuación de la ventilación en un invernadero puede permitir determinar el mínimo área de apertura y disminuir así el riesgo de sobrecalentamiento del invernadero en periodos de verano (Demrati *et al.*, 2001).

Boulard y Wang (2000) estudiaron el flujo turbulento de aire junto con los modelos de temperatura del aire y transporte de humedad en un invernadero clásico tipo túnel, situado cerca de Avignon en el sur de Francia.

Las medidas realizadas mediante anemómetros tridimensionales e higrómetros de respuesta rápida revelaron una heterogeneidad en el lado a barlovento del invernadero. Para vientos perpendiculares al eje del túnel, el flujo de aire mostró una fuerte corriente atravesando el túnel entre las aperturas a barlovento y sotavento así como velocidades de aire moderadas en la sección vertical situada entre dos series consecutivas de ventanas (Boulard *et al.*,2000).

La distribución de temperatura mostró un gradiente norte-sur debido a la entrada de aire frío a través de la ventana y un gradiente vertical sobre la superficie del suelo debido a la absorción de energía solar por el suelo. Los modelos de vapor de agua del aire fueron muy diferentes de los modelos de temperatura del aire, con áreas húmedas sólo concentradas en la superficie del suelo cerca de la fuente de agua evaporada. El análisis del espectro energético mostró que todas las localizaciones tenían niveles espectrales similares en la región de disipación (Boulard *et al.*, 2000).

Con el diseño de ventanas de estos experimentos los resultados demostraron que las condiciones de media y turbulencia del viento en gran parte del volumen del

invernadero eran similares a las exteriores, particularmente cerca de la superficie del suelo donde los cultivos estaban creciendo.

El crecimiento de la planta se vería aumentado por las condiciones turbulentas y menos heterogéneas, por tanto surge la necesidad de mejorar los diseños de las ventanas con objeto de reducir la velocidad media del aire y la turbulencia dentro del invernadero (Boulard *et al.,* 2000).

Se trata de encontrar un diseño, que puede perfeccionarse mediante simulaciones con CFD, que haga que el aire exterior se mezcle de forma más suave al nivel del cultivo con el aire interior, sin formar regiones con una penetración directa de aire exterior o regiones estancadas (Boulard *et al.,* 2000).

Un estudio llevado a cabo por Peeyush y Salokhe (2005), estudió el efecto del tamaño de malla de la pantalla térmica sobre la distribución vertical de temperatura en un invernadero tropical con ventilación natural. El pico vertical de temperatura absoluta del aire aumentaba con la altura sobre el suelo, excepto el punto cercano al suelo, que estaba más caliente que el localizado justo encima de él.

El mayor valor de temperatura del aire se registró en la zona más alta (a la altura del canalón), alrededor de 5ºC sobre el valor más pequeño. El aumento de la vegetación disminuyó significativamente la temperatura del aire en todas las localizaciones verticales, plantas más altas y/o mayor densidad de plantas supusieron menores picos de la temperatura del aire (Peeyush *et al.*, 2005).

El invernadero con la pantalla de malla más fina mostró un pico de temperatura del aire mayor que aquellas con una malla más gruesa. El doblar la densidad de plantas disminuyó la temperatura en todos los invernaderos. La temperatura del invernadero con

la malla fina disminuyó más que en aquél con la malla más gruesa (Peeyush *et al.*, 2005).

Las zonas más cercanas al suelo con menores temperaturas del aire respondieron mejor a incrementos en la cubierta vegetal. Los valores de temperatura por debajo del 60% del perfil en altura mostraron valores del 84-92% del valor máximo, mientras que por encima del 40% del perfil en altura se registraron valores del 92-100% (Peeyush *et al.*, 2005).

En el invernadero equipado con malla fina se registró un gradiente vertical de temperatura mayor (5-10ºC) que en el invernadero equipado con malla gruesa (2-5ºC).

Los resultados de este estudio sugirieron que, además del tipo de malla anti-insecto, la selección de la variedad de cultivo también jugaba un papel importante en el microclima del invernadero, ya que el volumen de vegetación así como su densidad afectaban significativamente a las concentraciones de calor. Los patrones de gradiente vertical de temperatura variaban con estos dos factores y por tanto se pueden incorporar en el desarrollo de modelos matemáticos específicos y más precisos de intercambio de aire mediante ventilación natural (Peeyush *et al.*, 2005).

Por último, en cuanto a ventilación de invernaderos, destacar el estudio realizado por Mistriotis y Briassoulis (2002), que centraron su investigación en el cálculo numérico, mediante el método de elementos finitos, de los coeficientes aerodinámicos internos y externos en una estructura tipo túnel con ventanas para un caso de viento transversal.

Se estudiaron las configuraciones de ventilación tanto con las dos ventanas laterales dispuestas simétricamente como con sólo una ventana en el lado de sotavento.

Los resultados numéricos mostraron que los coeficientes aerodinámicos externos estaban muy débilmente influenciados por la posición o el tamaño de las ventanas.

Por el contrario, los coeficientes aerodinámicos internos así como las presiones totales del viento sobre la estructura, dependían fuertemente de la configuración de la apertura de ventana (Mistriotis *et al.,* 2002).

3.3. HUMEDAD Y CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

El agua cumple una serie de funciones básicas en la vida de las plantas, constituyendo hasta el 95% de su peso fresco. El agua disuelve sustancias y es el vehículo de transporte de los nutrientes en las plantas. Es necesaria para la fotosíntesis y participa en muchas reacciones del metabolismo celular vegetal. Además, permite la refrigeración de las plantas mediante la transpiración al evaporarse, tras absorber calor y enfriar las superficies de las hojas (Castilla, 2007).

La transpiración consume energía (normalmente solar). Si se reduce la energía, se reduce la transpiración. Los aportes energéticos de la calefacción también contribuyen al proceso de evaporación (Castilla, 2007).

La transpiración depende de la radiación solar recibida y de las condiciones de humedad ambiental a nivel de la capa límite que rodea la hoja. La transpiración acusa un desfase respecto a la radiación solar desde la salida del sol hasta mediodía (Medrano, 1999).

Cuando la humedad del aire disminuye, aumentando el déficit de presión de vapor (DPV), la transpiración crece pudiendo generar, si no se controla, un estrés hídrico.

En condiciones mediterráneas los valores máximos de transpiración de un cultivo en invernadero como el tomate son de 6 mm diarios (Jolliet, 1999).

El estrés hídrico en un cultivo bajo invernadero provoca unas tasas de transpiración y fotosíntesis inferiores a las normales, lo cual afecta a la concentración de CO_2 y humedad del aire del invernadero.

Una conclusión extraída de este estudio fue que suspendiendo la ventilación durante cortos periodos de tiempo alrededor del mediodía, permitía la detección del estrés hídrico a partir de medidas climáticas rutinarias. Los mejores resultados se obtuvieron mediante la monitorización del CO_2. La detección por medio de medidas de humedad y temperatura fue menos exitosa. El estrés hídrico se detectó al mismo tiempo en el que la tasa de transpiración comienza a disminuir. El método de excitación mediante suspensión de la ventilación fue considerablemente mejor que la detección basada en observaciones con ventilación completa (Linker *et al.*, 2003).

Stanghellini *et al*. (1995) desarrolló un modelo de humedad en invernadero en el que la concentración de vapor dependía del balance entre tres flujos: transpiración del cultivo, ventilación y condensación en la cubierta. La transpiración y la fotosíntesis (la última mediante reacción estomática) se ven afectadas por la humedad ambiente. La humedad es también uno de los factores más importantes que pueden dar lugar a enfermedades, por lo tanto los sistemas de control climático modernos incluyen algunas medidas de control de humedad, siendo el parámetro controlado o bien la humedad relativa o bien el déficit de saturación.

En este estudio se obtuvo que la humedad relativa fue un buen índice de la posibilidad de rocío mientras que la transpiración estaba más relacionada con el déficit de saturación, a pesar de que tanto el clima como las condiciones del cultivo afectaban a la relación entre el parámetro y el proceso. Con un modelo de humedad como el descrito

en este estudio se pueden deducir los valores de consigna de temperatura y ventilación a partir del nivel deseado de un proceso del cultivo (en este sentido, eliminando el uso de un parámetro de humedad intermedio para el control climático).

Boulard *et al.*, (2000) presentó un modelo simple de transpiración del cultivo en invernadero capaz de predecir ésta a partir de condiciones exteriores y se discutieron diferentes parámetros implicados con respecto a diferentes tipos de sistemas de cultivo bajo invernadero. Este modelo se validó con datos experimentales medidos en un cultivo de tomate sin tierra en Avignon durante el periodo de verano, cuando el invernadero estaba abierto, y durante el periodo de temprana primavera, cuando el invernadero se mantuvo cerrado y el aire interior fuertemente confinado. El fenómeno de evapo-condensación sobre la cubierta, particularmente importante cuando el invernadero estaba cerrado, no se consideró para el balance de vapor de agua. La estimación del modelo mejoró desde la primavera hasta el verano y comparando con modelos de transpiración anteriores se vio que el considerar el clima exterior en vez del clima interior como una condición límite, implicó un empeoramiento del comportamiento del modelo, especialmente cuando el aire del invernadero se encontraba confinado. Este empeoramiento se debía a simplificaciones introducidas durante la derivación del modelo. El comportamiento del modelo fue satisfactorio cuando el aire del invernadero estaba muy cerca de las condiciones exteriores.

La heterogeneidad de la transpiración del cultivo es importante para entender claramente los mecanismos microclimáticos y para manejar eficientemente la fuente de agua en invernaderos. Así, Boulard y Wang (2002) utilizaron un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar las distribuciones del clima y de la

transpiración del cultivo en un invernadero de plástico de 22 x 8 m^2 situado en Avignon, Francia, junto con un modelo de radiación solar global y con un modelo de intercambio de calor del cultivo.

La transpiración del cultivo se dedujo asimilando el cultivo a un medio poroso intercambiando calores latente y sensible con su entorno. El modelo se validó mediante datos experimentales. El modelo validado se utilizó finalmente para predecir el flujo de transpiración de un cultivo de lechuga madura en un invernadero tipo túnel.

El estudio de la distribución de radiación solar, modelos de flujo de aire y campos de humedad y temperatura generados mediante estructuras de invernaderos, viento y fuerzas de capa límite y flotabilidad en un invernadero con ventilación natural, puede llevarse a cabo mediante un software de CFD para considerar también las transferencias de calor por radiación y la transpiración del cultivo (Boulard *et al.*, 2002).

Una alta humedad nocturna en invernaderos puede conducir al desarrollo de enfermedades fúngicas. Tradicionalmente la deshumidificación del aire del invernadero en climas templados se conseguía por medio de ventilación periódica. Una operación más eficiente se puede conseguir provocando la ventilación por medio de un sensor de humedad o un sensor de lluvia por enfriamiento. El sensor de lluvia es una especie de hoja artificial. En este estudio se usó un sensor de lluvia termoeléctrico para poner en marcha un ventilador, un calefactor o una combinación de ambos, para deshumidificar un pequeño invernadero de experimentación (Seginer *et al.*, 1997).

Cuanto más aumentaba el enfriamiento del sensor, también aumentaba el margen de seguridad frente a condensación, aumentando la diferencia entre la temperatura del

cultivo y la temperatura de rocío del aire del invernadero. El margen de seguridad se incrementó alrededor de 0.8ºC para cada enfriamiento de 1ºC del sensor.

Los resultados obtenidos mostraron que la necesidad de deshumidificación se incrementaba con la humedad atmosférica y se reducía con la velocidad del viento (la cual aumentaba la infiltración natural) (Seginer *et al.*, 1997).

La presencia de condensación sobre los materiales de cubierta puede generar un comportamiento diferente en la difusión de la luz a través de ellos. En este estudio se compararon las propiedades de dispersión de la luz de cuatro materiales de cubierta. En estado seco, el cristal simple se comportaba como un material no difusivo en contraste con los tres films plásticos, los cuales dispersaban la radiación. En estado seco no se observó durante los experimentos un efecto significativo del ángulo de incidencia sobre el comportamiento dispersante de los cuatro materiales (Pieters *et al.*, 2003).

La dispersión de los materiales de cubierta aumentó con la condensación, a excepción del polietileno anti-goteo. Esto llevó a que se redujera considerablemente la intensidad de radiación en el rayo directo (Pieters *et al.*, 2003).

En otro grupo de experimentos desarrollados por Pollet y Pieters (2002) se determinaron transmitancias del PAR en dos tipos de cristal y en tres tipos de films plásticos. Se ensayaron tanto en los casos de material seco como en los casos en los que existía condensación sobre el material, ya que la condensación ocurre frecuentemente sobre los materiales de cubierta del invernadero.

Los resultados del film anti-goteo y anti-condensación confirmaron que añadiendo los agentes anti-goteo al plástico se puede eliminar el efecto negativo sobre la transmitancia que ejercen las gotas condensadas.

La transmitancia del polímero tratado con aditivos anti-goteo no mostró ninguna influencia sobre el rango de PAR.

La transmitancia de PAR de este plástico fue mucho mayor que la de otros films en estado mojado y para todos los ángulos de incidencia. En general, el impacto de la presencia de condensado sobre la transmitancia de los materiales de cubierta está muy relacionado con el ángulo de incidencia y con el tipo de material de cubierta. Los materiales usados en este estudio eran nuevos, sin ningún desgaste (Pollet *et al.*, 2002).

La cubierta de plástico utilizada en invernaderos cambia significativamente el balance de radiación con respecto al ambiente exterior, debido a la atenuación (absorción y reflexión) de la radiación solar incidente, resultando en una reducción del balance de radiación interna y como consecuencia, afecta a la evapotranspiración (Sentelhas, 2001).

Los ojos compuestos de los insectos son tricromáticos, de forma que perciben el color mediante receptores que captan la luz en tres regiones: ultravioleta, azul y verde, lo que se ha conservado constante con su evolución (Briscoe y Chittka, 2001). En cultivos hortícolas se ha extendido la utilización de plásticos y mallas absorbentes de luz UV como método de control de plagas. Sin embargo, ello también representa un inconveniente para insectos beneficiosos (polinizadores y agentes de control biológico) que se encuentran necesitados del mismo espectro. Esto puede explicar la falta de polinización en cultivos hortícolas en invernaderos, ya que las obreras adultas no pueden distinguir las flores cuando se utiliza dicho tipo de plástico (Cabello *et al*, 2005).

Campen y Bot (2002) propusieron un sistema deshumidificador basado en condensar vapor de agua procedente del aire del invernadero.

El sistema se investigó primero mediante CFD ya que los coeficientes de transferencia de masa y energía no se conocían a priori y luego el sistema se ensayó en invernadero.

En estos experimentos, un metro de tubería de pequeño diámetro por la que circulaba agua a 5ºC podía retirar 54 g h^{-1} de vapor de agua del aire a una temperatura de 20ºC y 80% de HR (Campen *et al.,* 2002).

De los resultados se deduce que la fracción de calor latente eliminada sobre el total de calor eliminado es menor del 40%. Para aire con una humedad relativa del 80% sólo una tercera parte del calor eliminado es calor latente. Mediante simulaciones a lo largo de un año podría verse si este sistema es más eficiente desde el punto de vista energético que la ventilación convencional (Campen *et al.,* 2002).

Seginer (2002) centró sus estudios en la ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith como elemento para el diseño de la ventilación en invernaderos. La transpiración es el mecanismo más importante de los cultivos bajo invernadero. Cuanto mayor es este componente de disipación de energía, menor es la tasa de ventilación requerida.

El coeficiente de evaporación, conocido como la fracción de radiación disipada como calor latente, es por tanto un parámetro importante para el diseño de la ventilación, del cual, hasta ahora, los diseñadores no tenían más que un conocimiento cualitativo. Para superar esta dificultad, se propuso incorporar la ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith dentro de la fórmula estándar de ventilación. Mediante esta

modificación, el diseño se adaptaba no sólo a diferentes cargas de radiación y temperaturas sino también a diferentes condiciones de humedad.

La nueva fórmula de diseño puede modificarse para invernaderos que dispongan de un sistema de refrigeración evaporativo y la temperatura del aire o la del cultivo podrían utilizarse como criterio de diseño (Seginer, 2002).

El coeficiente de evaporación es sensible a las condiciones atmosféricas y a la tasa de ventilación. Combinando la fórmula de diseño de la SAE (Society of Agricultural Engineers) con la de Penman-Monteith, se sustituye el coeficiente de evaporación por dos parámetros (resistencia aerodinámica y la resistencia estomática o bien el coeficiente de radiación y el coeficiente aerodinámico), los cuales son mucho menos sensibles a estos factores (Seginer, 2002).

La aplicabilidad de este enfoque depende de la disponibilidad de coeficientes de Penman-Monteith fiables para el volumen del invernadero, los cuales podrían mejorarse mediante un análisis conjunto de los datos provenientes de diferentes regiones climáticas (Seginer, 2002).

3.4. CONTROL CLIMÁTICO EN INVERNADEROS. MODELOS

La regulación de un proceso en un sistema físico, agrupa el conjunto de técnicas y medios materiales que se dedican a conseguir que, sea cual sea la perturbación, la magnitud física a regular iguale un valor deseado que se llama consigna (Urban, 1997-a). Para que estos dos valores se igualen se dispone de uno o varios accionadores que ponen en funcionamiento uno o más equipos. Por ejemplo, si se quiere reducir la temperatura de un invernadero cuyo valor está en 25ºC y cuya consigna son 23ºC, se

pondrán en marcha los motores de apertura de ventanas para ventilar y aproximar la temperatura del aire del invernadero al valor de consigna (Castilla, 2007).

Para poder realizar el control climático del invernadero se utilizan modelos. Un modelo es una representación simplificada de un sistema o de una parte del mismo que viene dada por una serie de ecuaciones matemáticas. Existen muchas clases de modelos, estáticos, dinámicos, etc. Los sistemas de regulación anticipados ("*feed-forward*") utilizan modelos que determinan los efectos previsibles de una perturbación en el proceso que se regula y preventivamente ajustan las consignas a esa nueva situación.

En un invernadero se pueden distinguir dos grupos de modelos: físicos, que se centran en el microclima del invernadero en función del clima exterior, y los fisiológicos, que se centran en la planta y en su relación con el microclima del invernadero (Castilla, 2007).

Los modelos de simulación pueden ser de cualquier tipo, desde el más simple al más complejo, y son de gran utilidad si están bien concebidos y validados para simular diversas situaciones reales con bajo coste (Soriano *et al.*, 2004).

La utilización de modelos en el diseño y manejo de sistemas de control ha sido amplia y muy positiva, pero su aplicación a nivel comercial ha sido limitada y restringida a invernaderos bien equipados (Gary, 1999). Las reticencias en el empleo de modelos por parte de los usuarios nacen de la necesidad de que los modelos sean simples, robustos y universales (Bailey *et al.*, 1999).

Durante la última década se ha mejorado considerablemente el desarrollo en la construcción y operación en invernaderos, principalmente en los países del Norte de Europa. Dichas mejoras tuvieron lugar en diferentes áreas, tales como el desarrollo de

nuevas técnicas de construcción y actuadores así como también el modelado de los procesos fisiológicos de la planta y del clima del invernadero.

Hoy día dados los requerimientos económicos y medioambientales, se hace necesario alcanzar un manejo óptimo del invernadero para incrementar la eficiencia de la producción del cultivo. En este estudio se presentaron métodos y herramientas informáticas para automatizar un proceso de decisión óptima para controlar el clima del invernadero, mediante una optimización dinámica que no dejaba de lado el punto de vista económico del productor (Boaventura *et al,* 2003).

El clima del invernadero y los modelos de cultivo son esenciales para mejorar el manejo medioambiental y las eficiencias de control. Boaventura (2003) realizó un estudio centrándose en los comportamientos dinámicos de la temperatura del aire interior, los modelos de humedad y concentración de CO_2 y sus dominios de aplicación.

Los modelos se describieron como funciones del clima exterior, las acciones de control llevadas a cabo y la transpiración de las plantas.

Los sistemas de control por ordenador para el manejo del clima en invernaderos mejoran la posibilidad de obtener una mayor productividad y ahorro energético. Un aspecto muy importante es la elección de un algoritmo de control adecuado y una estrategia ajustada a las condiciones locales. Spanomitsios (2001) desarrolló un modelo de control adaptado a invernaderos bajo condiciones mediterráneas. Este modelo estuvo basado en un algoritmo de control de la temperatura adaptado a las necesidades locales y a las condiciones climáticas. Se probó su eficiencia en un invernadero de plástico en el que se cultivaba gerbera. El algoritmo puso en fase las temperaturas interiores del invernadero con la temperatura exterior por medio de un reloj solar. Además, se moduló la temperatura deseada en función de la radiación global.

Se consiguieron ahorros de energía del 16% sin pérdida del rendimiento del cultivo durante dos años consecutivos de crecimiento, mediante la utilización de una consigna de temperatura elevada durante la noche cuando el clima era frío y ventoso y una consigna menor cuando las condiciones climáticas eran más cálidas y sin presencia de viento (Spanomitsios, 2001).

Aparte del control de los niveles de temperatura, en los invernaderos comerciales existen otros parámetros importantes como la humedad, la radiación y la concentración de CO_2; en particular los niveles de humedad relativa y las medidas contra la condensación son factores que no siempre se toman en cuenta en las estrategias de control del clima (Perales *et al.*, 2003).

Si la humedad relativa alcanza el 100% significa que la humedad absoluta es igual a la humedad de saturación, con lo que se produce la saturación de la atmósfera. El rango óptimo de humedad relativa para los cultivos es entre el 55% y el 90%. Un exceso de humedad relativa favorecerá la aparición y difusión de enfermedades, mientras que las humedades bajas pueden causar el cierre estomático así como provocar problemas de estrés por altas temperaturas (Perales *et al.*, 2003).

La condensación en el techo provoca pérdidas de radiación, ya que se reduce la transmitancia de la cubierta y goteo sobre el cultivo. Este goteo y la condensación sobre las plantas facilitan la proliferación de enfermedades criptogámicas (Perales *et al.*, 2003).

Fueron varios los experimentos llevados a cabo para reducir la condensación en los invernaderos de la ETSIA de Madrid y del IRTA de Cabrils. Se compararon los resultados obtenidos con calefacción por agua caliente y por aire caliente. La calefacción por aire caliente fue más eficaz que la de agua caliente para controlar la humedad relativa. Según los resultados obtenidos, la apertura de la ventana cenital 25 cm combinada con calefacción, consiguió siempre reducir la humedad relativa. La desventaja que supuso dicha apertura fue el mayor consumo energético en calefacción, pero en estos ensayos la diferencia en el consumo de energía fue muy pequeña. Como estrategia de control, valores de consigna razonables fueron la apertura de la ventana cenital con 90% de humedad relativa y el cierre con 80%. La humedad exterior no solía influir, a no ser que estuviese lloviendo fuera (Perales *et al.,* 2003).

En estos experimentos, además de combinar la apertura de ventana cenital con ambos sistemas de calefacción, también se compararon la apertura de la ventana en continuo (con 25 cm y con 70 cm, área máxima), o la apertura del área máxima de ventana (70 cm) pero de forma discontinua. Los resultados parecieron indicar que una estrategia simple y segura de control es la apertura continua de un área reducida hasta que se consiga reducir la humedad relativa a límites aceptables, siempre combinada con calefacción.

Aperturas superiores pueden ser más eficaces, en determinadas condiciones, para reducir la humedad relativa, pero también ocasionan variaciones mayores de temperatura interior y un mayor consumo de energía (Perales *et al.,* 2003).

El diseño del techo del invernadero influye en los problemas de condensación.

Los invernaderos de cubierta plástica y techo curvo tienen un peor diseño contra la condensación ya que en la cumbrera la pendiente es nula, el agua no escurre y las gotas se acumulan.

Como pocos invernaderos cuentan con calefacción, una recomendación posible es la apertura gradual de la ventana cenital a medida que el sol va calentando el invernadero, es decir, la utilización del sol como sistema de calefacción (Perales *et al.*, 2003).

En invernaderos con calefacción el problema consiste en el control de la ventana cenital para que sólo realice una apertura reducida contra la condensación de noche y a primera hora de la mañana, pero que pueda abrirse al máximo a mediodía, una situación típica por ejemplo del mes de mayo (Perales *et al.*, 2003).

Las ventanas pueden estar controladas mediante un termostato. Si se incorpora un interruptor horario, el usuario puede fijar el periodo de actuación contra la condensación. Con un relé temporizado, se puede fijar el porcentaje de apertura de la ventana, fijando el tiempo para que abra unos 25 cm. El resto del tiempo, la ventana estará controlada por el termostato, con la apertura al máximo.

Los invernaderos controlados con ordenador generalmente permiten ventilar de un modo combinado por temperatura y humedad. La acción de apertura y cierre es gradual en función de la diferencia entre el valor medido y el valor de consigna (Perales *et al.*, 2003).

En un estudio realizado por Perdigones y Pascual (2005) centrado en la refrigeración de invernaderos, la transpiración del cultivo resultó ser un factor significativo, reduciendo la temperatura del interior en 0.8ºC de media para diferentes combinaciones de climatización ensayadas. Sin embargo, el efecto del cultivo era muy pequeño con altas

dosis de nebulización, donde el aire estaba casi saturado. La nebulización por encima de la pantalla resultó un método interesante para la refrigeración de invernaderos con bajos incrementos de la humedad relativa por debajo de la pantalla térmica, comparado con la nebulización directa sobre el cultivo.

Katsoulas y Baille (2001) centraron sus experimentos en el estudio de la influencia del control de la humedad sobre la tasa de transpiración, el flujo de calor sensible y la cantidad de conductancia estomática en un invernadero situado en la costa este de Grecia.

En invernaderos de las regiones mediterráneas, se observan altas temperaturas ($T > 35^{o}C$) y altos déficits de presión de vapor durante el verano. Estas condiciones son las responsables del descenso de rendimiento y calidad de la producción bajo invernadero.

La ventilación es normalmente el primer paso para refrigerar el invernadero, pero por lo general no es suficiente para extraer el exceso de energía durante los días soleados de verano. (Baille, 1999)

En estos experimentos se utilizó un sistema de refrigeración por nebulización, y se observaron descensos significativos de la temperatura del aire y del déficit de presión de vapor, mientras se mantenía un nivel relativamente alto de tasa de transpiración. El bajo DPV permitió que las plantas mantuvieran una conductancia estomática mayor durante la mayor parte del día (Katsoulas *et al.*, 2001).

El control climático en invernaderos es posible gracias al uso de sensores capaces de medir diferentes variables climáticas: temperatura, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento, concentración de CO_2, precipitaciones, etc.

Un sensor es un dispositivo que produce una señal utilizable en función del valor de una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir.

Cada medida debe ser registrada y manejada por el personal de la explotación a través de un controlador o un ordenador, de forma que el propio usuario pueda verificar y modificar las consignas según las condiciones climáticas requeridas en cada momento (Perdigones *et al.*, 2004).

Dentro de los sensores de temperatura, las resistencias metálicas más comunes son las de platino (sensores PT-100), con un valor de 100 Ω a 0ºC y 135 Ω a los 100ºC. Una ventaja de las sondas PT-100 a cuatro hilos es que la distancia entre sensor y sistema de adquisición de datos no influye en la medida. Dentro de los sensores de humedad, los sensores capacitivos están formados por dos electrodos entre los que se encuentra un polímero higroscópico sintético (dieléctrico). Este material puede absorber el agua en el aire, de manera que la capacidad del sensor varía linealmente con la HR. Al aumentar la humedad del aire también lo hace la capacidad del sensor capacitivo. Su principal inconveniente es que a humedades altas (100% HR) el dieléctrico se satura y tarda en volver a medir correctamente si no se encuentra bien ventilado. Actualmente son los más recomendados por sus grandes ventajas, fundamentalmente porque se pueden conectar fácilmente a equipos de control automático (Perdigones *et al.*, 2004).

En cuanto a los sensores de radiación, el piranómetro se usa para medir la radiación solar global en unidades de energía (W m^{-2}). Un sensor de este tipo puede medir en un campo entre 0 y 1500 W m^{-2}, y en el rango espectral entre 300 y 2800 nm.

Algunos están basados en un detector fotovoltaico cubierto por una protección de aluminio anodizada. El piranómetro es el sensor adecuado para medir energía incidente

para la evaluación energética de un sistema, por ejemplo en un invernadero o en paneles solares (Perdigones *et al.,* 2004).

Como sensores de velocidad y dirección de viento se pueden usar o bien anemómetros de cazoletas o bien anemómetros de hilo caliente. Los primeros necesitan un valor mínimo de velocidad del viento para funcionar, normalmente entre 0.5 y 1 m s^{-1}. Este tipo de anemómetros son muy utilizados y recomendables para medir la velocidad del viento en el exterior del invernadero, generalmente con un rango entre 1.5 y 50 m s^{-1}.

Los anemómetros de hilo caliente pueden usarse para medir la velocidad del viento en el interior del invernadero, ya que permiten velocidades pequeñas (< 0.5 m s^{-1}). Generalmente su uso está limitado a la investigación en relación con estudios sobre ventilación (Perdigones *et al.,* 2004).

Los sensores de concentración de CO_2 más utilizados son los analizadores de gases en el infrarrojo (IRGA). Se basan en el poder de absorción de la radiación infrarroja del CO_2.

Dentro de los sensores de lluvia se analizan dos tipos: el pluviómetro y los sensores de detección de lluvia. El pluviómetro es un medidor de la precipitación líquida que transforma la cantidad de lluvia en pulsos eléctricos, correspondiendo generalmente cada pulso a 0.1 ó 0.2 mm (según tipo de pluviómetro) de precipitación. Se pueden encontrar en diferentes volúmenes (Perdigones *et al.,* 2004).

Por el contrario, los sensores de detección de lluvia no miden la cantidad de agua como los pluviómetros, sino que detectan la presencia o no de lluvia. Las gotas de lluvia serán las responsables de cerrar el circuito electrónico (en general, una placa impresa de cobre) que lleva el sensor para dar la señal correspondiente. Su principal aplicación para

invernaderos consiste en poder conectar o desconectar un dispositivo (por ejemplo el motorreductor para abrir o cerrar las ventanas) en función de la presencia o no de lluvia. También se puede utilizar para detectar la presencia de condensación (Perdigones *et al.*, 2004).

Tradicionalmente se trata de mantener el clima en el invernadero de la forma más constante posible, aunque pueden producirse algunas variaciones entre el día y la noche. Ottosen (2004) realizó un estudio en Dinamarca en el que se demuestra que durante el invierno, debido a que el nivel de luz ambiental es bajo y dado que la luz es la fuente de energía que se aprovecha en la fotosíntesis y en el crecimiento de la planta, bajo condiciones de iluminación pobres, los otros factores medioambientales no pueden aprovecharse de manera eficiente. El nivel de iluminación es entonces el factor limitante del crecimiento durante el invierno.

Si se tienen invernaderos de gran volumen, estos consumen demasiada energía para calefacción. Por eso, un control climático basado en la respuesta de las plantas a la luz puede suponer un gran ahorro (Ottosen *et al.*, 2004).

En Dinamarca se ha desarrollado un sistema de control climático, IntelliGrow®, cuyo objetivo es suministrar temperatura y CO_2 en esos periodos en que las plantas puedan hacer uso óptimo de los recursos. De esta forma es posible ahorrar energía con cambios mínimos en el calendario de producción.

Comparado con un sistema de control climático estándar, los ahorros de energía en el período invernal han sido del orden del 20 al 40% (Ottosen *et al.*, 2004).

Boulard y Draoui (1995) también realizaron experimentos para calibrar y validar modelos climáticos en invernaderos. Mientras que las estructuras térmicas, como edificios o invernaderos son complicadas de modelar bajo condiciones transitorias, debido a los intercambios térmicos tanto por conducción como por convección y radiación entre las diferentes partes que los componen, la teoría de sistemas permite un análisis sencillo del comportamiento de las entradas y salidas en un invernadero. En particular, se pueden deducir modelos dinámicos sencillos a partir de las medidas realizadas *in-situ*. Es este estudio se describió un modelo climático para invernaderos que incorporaba la transpiración del cultivo, los efectos de la calefacción, ventilación natural y refrigeración evaporativa.

Representaba bastante bien los complejos mecanismos de intercambio de masa y energía, y permitió estudiar el clima interno del invernadero a partir del estado de sus actuadores tales como apertura de ventanas, calefacción aportada y el sistema de nebulización.

El profesor Dixon de la Universidad de Guelph (Wullschleger *et al.*, 1988) estudió un algoritmo para el control de la humedad en invernaderos. Probablemente el último gran reto del control automático del clima en invernaderos es el de controlar el vapor de agua atmosférico. Los estudios realizados en esta universidad se centraron en evaluar la aplicación del control de la humedad en invernaderos, su efecto sobre el clima del invernadero así como su efecto sobre la productividad y calidad del cultivo. El algoritmo desarrollado tuvo en cuenta las respuestas fisiológicas de las plantas, tales como transpiración, el estado de agua y el crecimiento, así como otras.

Las plantas no pueden reaccionar frente o detectar la humedad que está presente en el aire (hasta que condensa o cae sobre ellas), sin embargo, responden a la demanda atmosférica de humedad, que es otra forma de definir la humedad que no está presente en el aire. Éste es el déficit de presión atmosférica y es la diferencia entre la concentración verdadera o presión parcial de vapor en el aire y la máxima concentración posible para esa temperatura.

Por tanto todas sus medidas de humedad que estaban correlacionadas con las respuestas fisiológicas y crecimiento de la planta se evaluaron como DPV en vez de con la HR. En estos experimentos se mostró que las rosas, así como la mayoría de las plantas, experimentan un ciclo diario de estrés hídrico y recuperación.

La conclusión general de estos estudios fue que la humedad controlada a niveles apropiados mitiga el comienzo y extensión del estrés hídrico a medio día y contribuye a aumentar la expansión de las células y el crecimiento bajo otras condiciones estresantes para el cultivo.

Dai y Luo (2006) estudiaron un sistema para optimizar la temperatura de consigna en invernaderos calefactados basado en un modelo climático. Las temperaturas de consigna del aire del invernadero afectaban no sólo al crecimiento del cultivo y a su desarrollo sino también al consumo de energía para el control climático del invernadero.

En este estudio se desarrollaron un modelo de crecimiento del cultivo y un modelo de consumo energético, ambos validados bajo condiciones de clima subtropical, y fueron utilizados para desarrollar un sistema de apoyo a la decisión basado en el modelo para la optimización de la temperatura de consigna para calefacción de invernaderos.

La temperatura de consigna para calefacción de invernaderos puede optimizarse de acuerdo con un mayor ratio de producción de biomasa o rendimiento, a la energía consumida o a un mayor rendimiento o fecha de cosecha.

El sistema desarrollado en este estudio puede usarse para optimizar las consignas tanto en calefacción de invernaderos automatizada o no.

Otros autores han desarrollado modelos estadísticos del clima interior de un invernadero con ventilación natural. Litago y Baptista (2005) desarrollaron dos modelos de series temporales para simular la temperatura interior del aire del invernadero y la humedad relativa.

El microclima del invernadero se analizó con datos tomados cada hora, usando métodos de co-integración y corrección del error. El estudió reveló que la temperatura interior estaba relacionada significativamente con la radiación solar, la temperatura exterior y la tasa de ventilación (Litago *et al.*, 2005).

Por otro lado, la humedad relativa interior estaba relacionada con la evapotranspiración, la tasa de ventilación y la humedad relativa exterior. A pesar del gran número de parámetros involucrados, los modelos estimados dieron una buena aproximación de la temperatura del aire interior y de la humead relativa interior.

La temperatura y humedad relativa internas para diferentes días del periodo de muestra se simularon con precisión mediante los modelos de corrección del error elegidos. Estos modelos pueden por tanto ser usados para estimar y predecir las condiciones de clima interiores de los invernaderos mediterráneos (Litago *et al.*, 2005).

Para poder plantear los modelos climáticos del control del clima en invernaderos es necesario examinar los equivalentes de energía tanto de entradas como de salidas.

Así Ozkan y Kurklu (2004) realizaron un estudio en un invernadero de producción vegetal en la provincia de Antalya (Turquía). Estudiaron los balances de entradas-salidas de energía para varias especies de cultivo: tomate, pepino, berenjena y pimiento.

Öztürk y Basçetinçelik (2003) estudiaron los balances de energía y la eficiencia energética de una unidad de acumulación de calor para calefacción en invernaderos. En esta investigación, la energía solar se almacenó durante el día usando material volcánico con la técnica de calor sensible para calentar un invernadero tipo túnel de 120 m^2. La unidad de acumulación de calor externo consistió en 27 m^2 de aerotermos solares montados con un ángulo de inclinación de 55º. Las dimensiones del almacén de calor eran 6 m por 2 m y por una profundidad de 0.6 m.

Este almacén de calor se localizó bajo el suelo, en el centro del invernadero. El volumen por metro cuadrado de superficie de suelo de invernadero de la unidad de acumulación de calor fue de 0.06 m^3, mientras que el volumen de acumulación por metro cuadrado de la unidad de acumulación de calor fue de cerca de 0.27 m^3 (Öztürk *et al.*, 2003).

Uno de los progresos realizado durante la década de los noventa en la ingeniería de invernaderos se centra principalmente en estudios experimentales del comportamiento de láminas individuales de material de cubierta, buscando una variedad de propiedades.

Las propiedades analizadas se estudiaron en rangos de medidas del PAR y transmisión del espectro para investigar los efectos del cambio de pequeñas regiones del espectro sobre el comportamiento del cultivo.

El efecto del agua en la transmisión de la radiación bien como una lámina fina de agua o bien como gotas, ocuparon gran parte de estos estudios y todavía existen problemas

para predecir esos efectos debido a las diferentes formas de las gotas de agua. Sin embargo, los modelos por ordenador están preparados para predecir la transmisión de la luz en su presencia (Critten *et al.,* 2002).

Otros estudios buscaron la mejora en el asilamiento de un invernadero buscando reducir las pérdidas por transmisión producidas a través del material de cubierta. El diseño de invernaderos desde el punto de vista económico está basado en un compromiso entre la maximización de la transmisión de la radiación solar y la minimización de las pérdidas de calor (Swinkels *et al.,* 2001).

Con una inclinación del zigzag cerca de 90º, teóricamente se podría alcanzar una transmisión de radiación difusa cercana al 100%. En la práctica, sin embargo, la absorción de luz por el material restringe las altas transmisiones, las cuales se optimizan mediante inclinaciones del zigzag de alrededor de 50º. No obstante, el invernadero cubierto por una chapa de doble zigzag tiene una pérdida de transmisión difusa de 1.6% y una ganancia de transmisión de radiación directa cerca del 5%, comparado con un cristal simple, para un invernadero orientado norte-sur. Si el canalón está orientado este-oeste, la pérdida de luz directa puede estar cerca del 15% comparado con una cubierta de cristal de una capa (Swinkels *et al.,* 2001).

La cubierta con las chapas en zigzag tiene un coeficiente total de intercambio que es un 16% menor comparado con una cubierta de cristal de una capa. Está claro que el intercambio de calor está dominado por la radiación térmica, por tanto sería deseable el uso de una cubierta que restringe la radiación térmica, sin reducir demasiado la transmisión de luz (Swinkels *et al.,* 2001).

Soriano y Montero (2004) centraron su investigación en el estudio de la transmisión de la radiación solar en invernaderos multitúnel asimétricos mediante la utilización de modelos a escala y modelos de simulación. El uso de modelos a escala es perfectamente válido para caracterizar la transmisión de radiación solar directa en invernaderos, con diferentes ángulos de inclinación de cubierta, ya que las medidas estaban en correlación con las predicciones mediante un modelo de simulación. Se encontró una mayor correlación entre los valores medidos y los simulados para los modelos con menor inclinación de cubierta.

Para la latitud estudiada, el incremento de la inclinación de cubierta mejoraba la transmisión de la radiación directa a lo largo del solsticio de invierno. En verano, sin embargo, los valores de inclinación de cubierta menores se correspondían con niveles de transmisión más altos (Soriano *et al.,* 2004).

La transmisión total es el producto de la transmisión a través del material de cubierta, de la transmisión a través de las partes de cubierta opacas, formadas por las partes dispuestas longitudinalmente tales como la cumbrera y el canalón, y de las partes transversales tales como las zonas vidriadas (Soriano *et al.,* 2004).

El ángulo de incidencia de la luz se varió desde 0 a 90º y se midieron los correspondientes valores de transmisión. Se utilizó STATGRAPHICS para determinar el mejor ajuste entre los valores de transmisión medidos y aquellos calculados mediante las ecuaciones de Fresnel, lo cual significaba que se podrían determinar el índice de refracción y el coeficiente de absorción (Montero *et al.,* 2001).

Los invernaderos asimétricos no tienen necesariamente que proporcionar mayor transmisión que los invernaderos simétricos.

De todos los modelos estudiados, el invernadero que tuvo la transmisión mayor fue el invernadero orientado este-oeste con una inclinación de cubierta de 27º (Soriano *et al.*, 2004).

Uchida y Fausto (2003) realizaron el modelado de la temperatura interior del invernadero por medio de modelos autoregresivos. En este estudio se investigó tanto un modelo lineal autoregresivo con entradas externas (ARX) como un modelo lineal autoregresivo de media móvil con entradas externas (ARMAX) para describir la temperatura del aire interior de un invernadero localizado en el oeste de Europa. Se consideraron cuatro variables de entrada como la temperatura del aire exterior, la humedad relativa exterior, la radiación solar global y la nubosidad del cielo. Ambos modelos fueron capaces de describir el comportamiento del invernadero durante la mayor parte del año, excepto para los periodos de ventilación, debido a que el comportamiento del invernadero se hace altamente no lineal cuando se imponen las estrategias de control. Por tanto, debe preverse la inclusión del efecto de la ventilación en los modelos.

Se observó que los modelos ARX se comportaban mejor que los ARMAX. A pesar de que la inclusión de la humedad del aire exterior en varios de los modelos estacionales no contribuyó significativamente a la precisión de los resultados durante la mayor parte del año, se observó que ninguna de las variables de entrada podría ser omitida en los modelos para un año completo (Uchida *et a.*, 2003).

Lamrani y Boulard (2001) estudiaron experimentalmente los patrones de flujo de aire en un invernadero tipo túnel a escala ½, para simular un invernadero grande multitúnel. La diferencia de temperatura entre el suelo calefactado y el techo, simulando la absorción de radiación solar por un cultivo, fue relativamente baja pero suficiente para simular las condiciones con sol durante el invierno en un invernadero cerrado. El flujo de aire general se caracterizó mediante técnicas de visualización con láser y los patrones de temperatura se obtuvieron directamente mediante termopares estáticos. Se realizaron más medidas cuantitativas mediante anemometría láser.

Una de las conclusiones extraídas fue que los perfiles de temperatura verticales se caracterizaban por un fuerte gradiente de temperatura en la superficie del suelo (60 - 70% de la diferencia de temperatura entre suelo y techo).

Las áreas situadas cerca del techo, paredes, suelo y especialmente las esquinas donde el flujo cambia de dirección, eran zonas de mayor intensidad de turbulencia.

Los valores de los coeficientes de intercambio convectivo entre suelo y techo, entre suelo y aire y entre el aire y el techo resultaron mayores que aquellos propuestos en la literatura para invernaderos a escala natural (Lamrani *et al.*, 2001).

Las correlaciones de Nusselt encontradas, obtenidas en las condiciones diseñadas para simular la temperatura real y las condiciones de humedad de un invernadero cerrado en invierno, pueden utilizarse para calcular los coeficientes de intercambio en invernaderos sin cultivo o con un cultivo bajo una radiación solar moderada (Lamrani *et al.*, 2001).

Las estrategias de control modernas para el control climático de invernaderos pueden utilizarse para reducir la infección del cultivo y para influir sobre el desarrollo de la planta. Para evitar medidas técnicas demasiado caras, es necesario describir los procesos

de transporte de masa y energía dentro del cultivo, los procesos de intercambio entre aire y planta y otras superficies. Se han desarrollado las bases de un manejo de control climático anti-botrytis basado en un modelo de cultivo (Tantau *et al.*, 2003).

Las temperaturas y déficits de saturación medidos y calculados en la cubierta vegetal estaban en concordancia. La desventaja del modelo de cultivo es que debe adaptarse a cultivos con diferentes estructuras geométricas. La combinación del modelo de cultivo y el modelo de enfermedad proporciona al usuario información sobre la influencia del control climático, la calefacción y el sistema de riego y la densidad de planta sobre el riesgo de infección (Tantau *et al.*, 2003).

3.5. MODELADO DEL CLIMA INTERIOR DEL INVERNADERO MEDIANTE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)

La Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) es una herramienta madura de diseño en ingeniería y se está utilizando cada vez más en varios estudios hortícolas y agrícolas. Reichrath y Davies (2002) revisaron el estado del arte de este método de cálculo y modelización en su aplicación al estudio de la interacción entre el clima interior del invernadero con condiciones de clima exterior y uso de un control medioambiental.

Desde el primer trabajo publicado sobre esta técnica por Okushima (1989) se ha producido un claro desarrollo en la complejidad y realismo del modelado mediante CFD, debido en parte al desarrollo del software y del hardware producido con el tiempo. Estos avances en el software han permitido obtener una mayor precisión en las predicciones así como la obtención de modelos más robustos y sofisticados, que utilizan algoritmos capaces de aplicarse en una amplia variedad de situaciones (Reichrath *et al.*, 2002).

Los primeros estudios con CFD que estudiaron el clima interior del invernadero se referían a invernaderos pequeños y a modelos a escala. En la mayoría de los casos se trataba de invernaderos vacíos. Sin embargo la mayoría de autores coinciden en que deben de tenerse en cuenta el efecto del cultivo y de los elementos estructurales. En estudios posteriores, se incluía la interacción del cultivo, representándolo como un medio poroso.

En trabajos posteriores deberían incluirse modelos de cultivo más detallados teniendo en cuenta sus efectos sobre la radiación, la humedad y la temperatura del interior del invernadero (Reichrath *et al.,* 2002).

Los modelos tridimensionales con CFD consiguen mayor precisión, sobre todo cuando los efectos en 3D juegan un papel importarte en los procesos de intercambio producidos en el interior del invernadero. No obstante, los modelos bidimensionales reducen la complejidad del proceso modelado así como los requerimientos computacionales netos sobre la radiación, la humedad y la temperatura del invernadero (Reichrath *et al.*, 2002).

Un aspecto importante para el cálculo mediante CFD es la elección de parámetros numéricos así como de condiciones límites adecuadas. Allí donde se aplica, las predicciones obtenidas mediante CFD mostraron un buen ajuste de los datos experimentales registrados. De esta forma, mediante CFD puede crearse una simulación de la "realidad virtual" del invernadero y estudiar los efectos de los diferentes parámetros que influyen en el clima interior del invernadero, sin necesidad de realizar medidas in situ que, además de ser un método caro, requiere un gran periodo de tiempo para su estudio (Reichrath *et al.,* 2002).

La calefacción a nivel de suelo en un invernadero se ha convertido en un tema muy discutido en las últimas décadas, dados los beneficios que tiene sobre los cultivos en invernadero. En este estudio se desarrolló y validó un modelo usando CFD en un invernadero dotado de calefacción por suelo radiante. Con el modelo se estudió el efecto del diámetro de la tubería de calefacción, del espaciado entre ellas, de la posición vertical de las tuberías en el suelo y de la conductividad térmica del suelo sobre el flujo

de calor a través del suelo y la uniformidad de temperatura en la superficie del suelo. Una de las conclusiones fue que aumentando el espaciado entre tuberías se incrementaba tanto la temperatura en la superficie del suelo como el flujo de calor en superficie, pero se reducía la uniformidad de temperatura en superficie. Asimismo, tuvo poco impacto en la reducción del flujo de calor a través del suelo. Usando un diámetro menor de tuberías con un espaciado menor entre ellas se incrementaba la temperatura, el flujo de calor y la uniformidad de temperatura en la superficie del suelo sin incrementar el porcentaje de la entrada de calor total al suelo que se perdía por la parte de abajo del suelo radiante (Reiss *et al.*, 2005).

Martijn y Wilko (2006) estudiaron diferentes geometrías de un intercambiador de calor de carcasa y tubos para la calefacción de invernaderos y su influencia en el coeficiente de intercambio de calor mediante la técnica CFD. La utilización de baffles fue tremendamente importante para mejorar el intercambio de calor. El número óptimo de estos está entre 3 y 5 y su existencia incrementaba la ventilación. Se obtuvieron mejores flujos de calor disminuyendo la anchura de la carcasa del intercambiador a la vez que se aumentaba el número de líneas de tubos (lo cual incrementaba la profundidad del intercambiador). Sin embargo, al aumentar el flujo de agua no se obtuvieron buenos resultados, ya que incrementando dicho flujo en 5 veces más, el flujo de calor sólo subió un 16%. Finalmente la diferencia entre la temperatura de entrada del agua y la temperatura del aire ambiente tuvo un impacto positivo en el flujo de calor, ya que si la temperatura del agua a la entrada se aumentaba hasta 50ºC (un 18% respecto a la inicialmente estimada), el flujo de calor crecía un 24%.

Utilizaron la aproximación de Boussinesq para relacionar la densidad del aire con la temperatura y el modelo κ-ω de turbulencia. Se analizaron dos modelos, uno que tenía en cuenta la radiación térmica y otro segundo que no la incluía en el modelo. Este último consiguió resultados aceptables, aspecto importante si se tiene en cuenta que al incluir la radiación térmica, el tiempo de cálculo puede incrementarse en 60 veces más (Martijn *et al.*, 2006).

Mistriotis y Arcidiacono (1997) llevaron a cabo un análisis sistemático del proceso de ventilación natural en invernaderos, en condiciones de "no viento" y en condiciones de bajas velocidades de viento, mediante la herramienta CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). La validez de este análisis se comprobó con éxito comparando los resultados numéricos con los datos experimentales. Se obtuvieron predicciones numéricas de la eficiencia de la ventilación en un invernadero típico mediterráneo para diferentes configuraciones de ventilación. Se confirmó la importancia de ventilación con ventanas laterales para una ventilación eficiente térmicamente conducida (*buoyancy effect*). El CFD es una herramienta muy potente para desarrollar diseños mejorados que evalúen a la eficiencia de la ventilación.

A pesar de que la ventilación es un proceso físico importante que influye en el microclima interior de un invernadero, hasta ahora no se había investigado demasiado. La ventilación puede usarse para un control óptimo de la temperatura, humedad y concentración de gases, tales como CO_2, en el interior del invernadero.

Normalmente no es usual tener sistemas de ventilación forzada, por lo tanto, la ventilación natural es por lo general el único proceso de renovación de aire en cultivo protegido (Mistriotis *et al.*, 1997).

En este estudio se realizó una aproximación numérica para investigar la eficiencia de la ventilación en invernaderos en condiciones de baja velocidad de viento. Por esta razón se analizó el comportamiento en cuanto a ventilación de las estructuras del invernadero, cuando las diferencias de temperatura del aire constituían la principal fuerza conductora del flujo de éste (*buoyancy effect*). Las simulaciones numéricas mediante CFD ofrecieron una foto detallada de la distribución espacial de temperatura y del campo de flujo de aire. En este artículo se proponía realizar estudios futuros con CFD en los que se tuvieran en cuenta los bloques de plantas y elementos estructurales internos del invernadero que puedan alterar el flujo de aire (Mistriotis *et al.*, 1997).

El proceso de ventilación en un invernadero, según otros estudios realizados por Mistriotis y Bot (1997) mediante CFD, depende de una variedad de factores interrelacionados. La eficiencia de la ventilación no depende sólo de sus características de diseño sino que también está influenciado por las condiciones meteorológicas y su localización. Se puede seleccionar un diseño óptimo (tamaño, forma y posición de las ventanas) sólo si se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas locales (dirección y velocidad de viento).

Bartzanas y Boulard (2004) investigaron el efecto que tiene la disposición de la ventilación en un invernadero tipo túnel con cultivo sobre el flujo de aire y los patrones de temperatura, mediante un código comercial de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Primero se validó el modelo numérico con los datos experimentales recogidos en un invernadero tipo túnel idéntico al usado en las simulaciones. Después de esto, el modelo CFD se usó para estudiar las consecuencias de cuatro configuraciones diferentes de ventilación sobre el sistema de ventilación natural. La configuración de la ventilación afectaba a la tasa de ventilación del invernadero así como al flujo de aire y a la distribución de temperaturas.

Los resultados mostraron que las mayores tasas de ventilación no fueron siempre el mejor criterio para evaluar el comportamiento de distintos sistemas de ventilación en invernaderos. Tales criterios fueron: velocidades de aire en la región cubierta por el cultivo, las resistencias aerodinámicas correspondientes así como las eficiencias de ventilación sobre la tasa de flujo y las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior (Bartzanas *et al.,* 2004).

Los criterios anteriores mostraron que la mejor solución fue la combinación de ventilación lateral y cenital. En aquellas situaciones con sólo ventanas laterales disponibles, las ventanas enrollables resultaron más eficientes que las pivotantes.

La herramienta CFD puede usarse razonablemente para proponer el diseño de las ventanas (tipo, tamaño y posición) para conseguir así alcanzar un invernadero bien ventilado y unas condiciones climáticas uniformes en la cubierta vegetal. En este artículo se proponía seguir estudiando distintos casos a los aquí ensayados, con diferentes direcciones de viento, invernaderos diferentes etc, porque podrían variar los resultados (Bartzanas *et al.*, 2004).

Un modelo tridimensional CFD propuesto por Campen y Bot (2003) fue capaz de determinar las características de ventilación específicas de un invernadero. Se consiguió también mediante el modelo CFD la relación lineal entre la tasa de ventilación y la velocidad de viento para una dirección de viento distinta, conocida a partir de datos experimentales aplicados a varios invernaderos.

La dependencia de la pendiente que presenta esta relación podría calcularse con la dirección del viento, la geometría del invernadero así como con sus alrededores. Los cálculos mediante CFD mostraron que variaciones en la dirección del viento de unos 10º pueden incrementar la ventilación hasta un 50% en algunos casos.

La geometría de las ventanas influyó enormemente sobre la tasa de ventilación. La configuración de ventana enrollable obtuvo mayores tasas de ventilación debido a las aperturas de ventilación mayores en la cubierta (Campen *et al.,* 2003).

Otros autores mostraron la utilidad de una técnica de laboratorio para el diseño de sistemas de ventilación más eficientes mediante la comparación de diferentes disposiciones de las ventanas. Así, según el estudio realizado por Montero y Antón (2001), el flujo de ventilación puede visualizarse y se pueden detectar aquellas regiones donde se acumula calor como consecuencia de una ventilación deficiente. Esta técnica puede usarse para estudiar invernaderos multitúnel de formas diferentes en los cuales los parámetros principales que afectan a la ventilación, tales como la altura del invernadero y el tamaño y posición de las ventanas, pueden cambiarse y determinar este efecto sobre la ventilación. Este método podría ser útil para poder definir las condiciones de contorno adecuadas de cara a estudios de los modelos de flujo del aire mediante CFD.

Jiménez-Hornero y Gutiérrez de Ravé (2005) desarrollaron un modelo de nudos (BGK), el cual resultó ser una alternativa válida para describir el flujo de aire natural en la sección de diferentes invernaderos con configuraciones de ventilación diferentes. Los resultados obtenidos estaban en concordancia con los obtenidos mediante CFD pero con la ventaja de que se necesitaba un código más sencillo para implementar el modelo. Se estudiaron con diferentes formas de invernadero, cubierta curva y asimétrica, etc.

Molina y Valera (2004) estudiaron la influencia de la velocidad del viento en el comportamiento de la ventilación para un invernadero tipo en Almería mediante un modelo numérico basado en el método de elementos finitos. Se estudió tanto el campo de flujo de aire como la distribución de temperatura, generados por un viento perpendicular a las ventanas de un invernadero que constaba de cinco túneles. Se probaron cuatro velocidades de aire diferentes (desde 7.7 hasta 1.0 m s^{-1}).

Los resultados de este trabajo mostraron la importancia de las ventanas cenitales. Todos los invernaderos de Almería tienen ventanas laterales, pero sólo el 35 - 40% disponen de ventanas cenitales y éstas resultaron importantes para la ventilación eficiente (Molina *et al.*, 2004).

Es importante estudiar aquellos casos en los que la velocidad del aire no es perpendicular a las ventanas laterales, porque eso podría influir sobre la ventilación. En estudios futuros de CFD se deberían incluir los intercambios de masa y energía entre el cultivo y el aire para poder describir la influencia de las plantas sobre el microclima del invernadero. Las ventanas deberían diseñarse de tal forma que se alcance una temperatura y velocidad de aire uniforme dentro del invernadero al igual que una temperatura óptima para el crecimiento del cultivo (Molina *et al.*, 2004).

Fatnassi y Boulard (2003) estudiaron los campos de velocidad, temperatura y humedad simulados mediante CFD, en un invernadero comercial a escala natural ocupado con cultivo de tomate y protegido con mallas anti-insectos. También se simularon los intercambios de masa y energía entre el cultivo y el aire tomando como condiciones de contorno las térmicas en varias paredes del invernadero.

El análisis de los patrones de flujo reveló campos muy complejos caracterizados por una corriente de aire con dirección similar al viento exterior en la parte del invernadero a barlovento y bucles de convección transversales causados por las ventanas cenitales con baja velocidad de aire en su centro y altas velocidades cerca del techo. Este flujo general explicaba los patrones de temperatura y humedad, con un incremento gradual de la temperatura del aire y del contenido de agua entre los lados a barlovento y sotavento del invernadero y entre la superficie del suelo y las ventanas cenitales.

El modelo obtenido consiguió valores muy similares a los medidos en cuanto a tasas de ventilación. Además con este modelo se estudió el efecto de la presencia de mallas anti-insectos sobre el clima interior del invernadero. Las simulaciones también sugirieron algunas mejoras tales como un incremento significativo del área de ventana para mantener condiciones climáticas adecuadas mientras se usen mallas anti-insectos.

Bartzanas y Boulard (2002) investigaron mediante un modelo numérico la influencia de una malla anti-insecto sobre el flujo de aire y los patrones de temperatura en un invernadero tipo túnel con ventanas laterales continuas, por medio de la herramienta CFD.

Las simulaciones dieron como resultado que la malla tenía un efecto considerable sobre el clima del invernadero. La malla disminuía fuertemente la velocidad del aire en el invernadero (especialmente dentro del área de cultivo) y también la tasa de flujo de aire (reducción del 50%), resultando en un importante incremento de la temperatura (unos 7ºC superior al invernadero sin la malla). El cultivo también actuó como una resistencia al flujo del aire y, así como la dirección del viento, también modificó el flujo y la distribución de temperatura.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. EL INVERNADERO EXPERIMENTAL

La metodología que se describe en esta tesis se ha utilizado para evaluar el efecto de diferentes estrategias de calefacción y ventilación sobre la condensación, a través de distintos modelos de predicción de la condensación en un invernadero de investigación de la ETSI Agrónomos de Madrid, localizado geográficamente a 40º26´36´´ de latitud N, 3º44´18´´ de longitud W y a una altitud del 595 m sobre el nivel del mar, en Madrid (España). Es un módulo de un invernadero multitúnel, de techo curvo y pared recta, con estructura de acero galvanizado y cubierta de plástico rígido (metacrilato) con una transparencia del 75% al 85% respecto a la radiación visible y una transmisión de radiación infrarroja en torno al 0.5%.

En la Figura 4.1 se puede apreciar la vista exterior del invernadero. La superficie de suelo cubierta era de 132 m^2: 6.6 m x 20 m (*Fig*.4.2). Una pared del invernadero estaba compartida con otro invernadero adyacente, aunque esta pared estaba también cubierta con metacrilato. La altura desde el suelo al canalón era de 3 m y el área de la cubierta de metacrilato expuesta al aire exterior era de 258 m^2.

En la campaña 2002/03 se cultivó *Gerbera jamesonii* en macetas/contenedores dentro del invernadero, dispuestas en ocho filas colocadas sobre el suelo radiante (sistema de calefacción descrito más adelante) y dos filas junto a las paredes laterales. Esto hacía que un 25% del suelo estuviera cubierto por las macetas.

La altura del cultivo era menor de 0.5 m y la densidad de cultivo de 4 plantas m^{-2}. En la campaña 2003/04 se cultivó *Helianthus annuus L.* (girasol) en las mismas macetas dentro del invernadero, con una densidad de cultivo de 2 plantas m^{-2}. Durante la campaña 2004/05 se volvió a cultivar *Gerbera jamesonii.*



Figura 4.1. *Vista exterior de los dos módulos que constituyen el invernadero experimental. Los experimentos se llevaron a cabo en el módulo de la derecha.*

Respecto a la ventilación, el invernadero dispone de ventana cenital, de 17.5 m de longitud, que permite abrir la mitad del techo con la cumbrera como eje de giro, prácticamente a lo largo de toda la longitud del invernadero (*Fig.*4.3). La ventana lateral, de 18 m de largo, llega desde el canalón hasta una altura de 2 m y recorre también toda la longitud del invernadero; está situada en el lado opuesto a la ventana cenital (*Fig.*4.4).

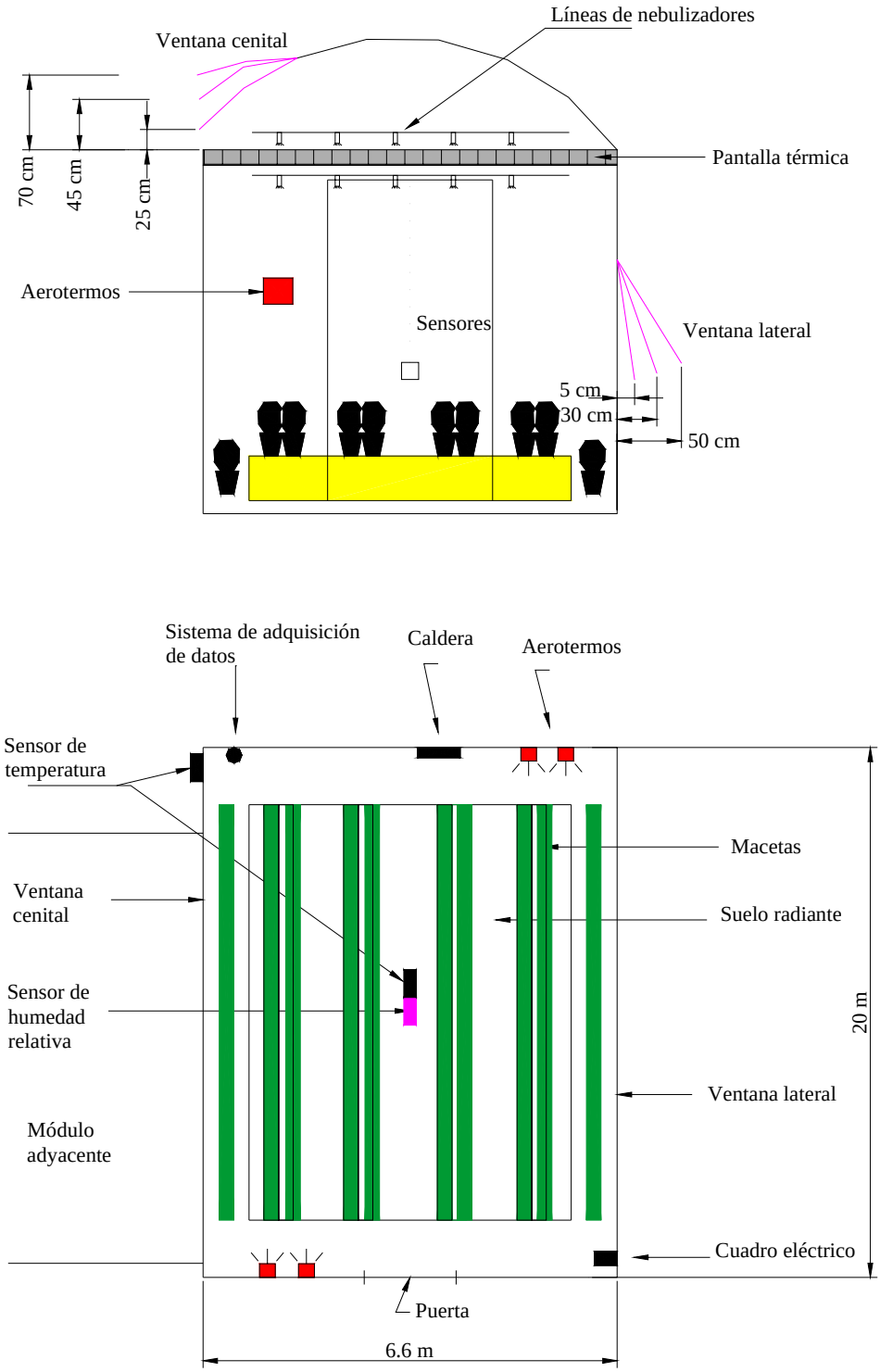


Figura 4.2. *Alzado y planta de la configuración del invernadero experimental.*



Figura 4.3. *Ventana cenital del invernadero.*



Figura 4.4. *Ventana lateral del invernadero.*

La apertura parcial de ambas ventanas es posible gracias a la instalación de un temporizador.

La malla de sombreo, cuyas dimensiones son de 6.6 m x 20 m (5 franjas de 4 m), está colocada a la altura del canalón (3 m); es de tipo aluminizada abierta con valores nominales del 75% de sombra y el 60% de ahorro energético (*Fig.*4.5).

El conjunto de tracción para la extensión/recogida está automatizado por medio de un motor trifásico; aunque se puede automatizar su apertura y plegado, en los experimentos se utilizó como si fuera fija en los días que correspondió usarla.



Figura 4.5. *Malla de sombreo y ahorro energético del invernadero durante la extensión.*



Figura 4.6. *Vista del invernadero con la pantalla térmica extendida.*

A continuación se muestra un esquema del invernadero con la pantalla térmica extendida y las ventanas cenital y lateral abiertas (*Fig*. 4.7).

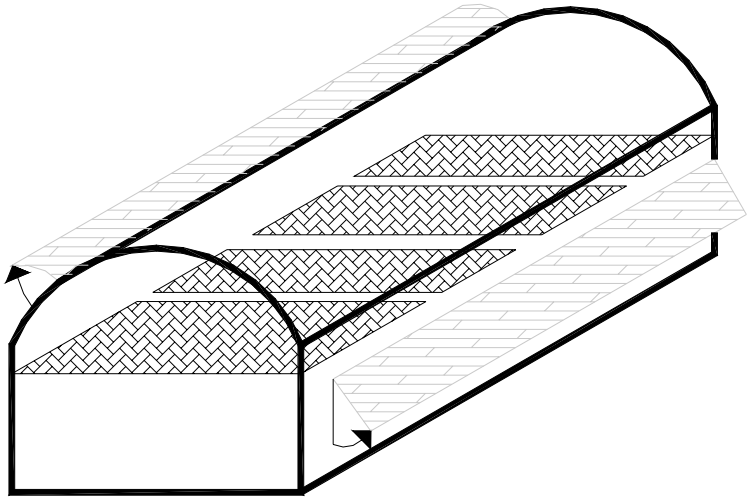


Figura 4.7. *Vista del invernadero con la pantalla térmica extendida y las ventanas cenital y lateral abiertas.*

Respecto a la calefacción, el invernadero dispone de dos sistemas de distribución del calor:

- **Agua caliente:** Sistema de calefacción por suelo radiante (113.6 W m^{-2}). Está formado por una malla de tubos de polietileno reticulado (540 m para 90 m^2 de suelo radiante) en el interior de 9 cm de mortero (*Fig.*4.9).

  Sobre el suelo de cemento del invernadero se colocaron una capa de aislante térmico (poliestireno expandido de 20 mm), una barrera antivapor (lámina de polietileno de 0.1 mm) y un mallazo de alambre a 20/20/4 mm para guiar los tubos. En la Figura 4.8 se puede observar un esquema de la disposición de los elementos del suelo radiante. El sistema se alimenta desde una caldera eléctrica de agua caliente de 15 kW (*Fig.* 4.10). El calor se emite desde la superficie del suelo.

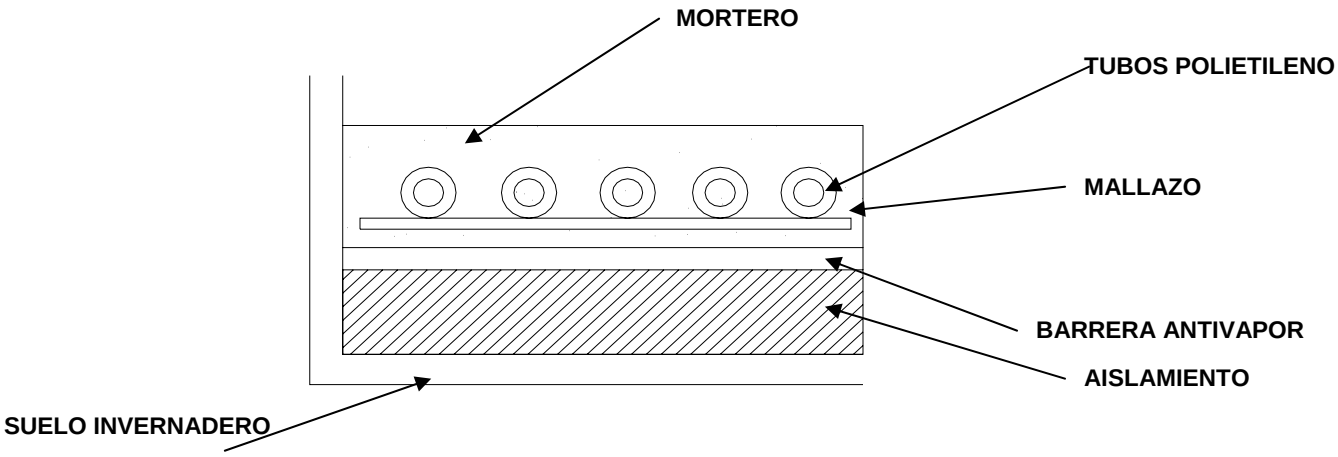


Figura 4.8. *Esquema de la disposición de los elementos del suelo radiante, formado por una red de tubos de polietileno reticulado en una capa de mortero. El diseño incluye, sobre el suelo del invernadero, una capa de aislante térmico (poliestireno expandido), una barrera antivapor (lámina de polietileno) y un mallazo metálico para guiar los tubos.*



Figura 4.9. *Vista del montaje del suelo radiante en el invernadero objeto de los experimentos.*

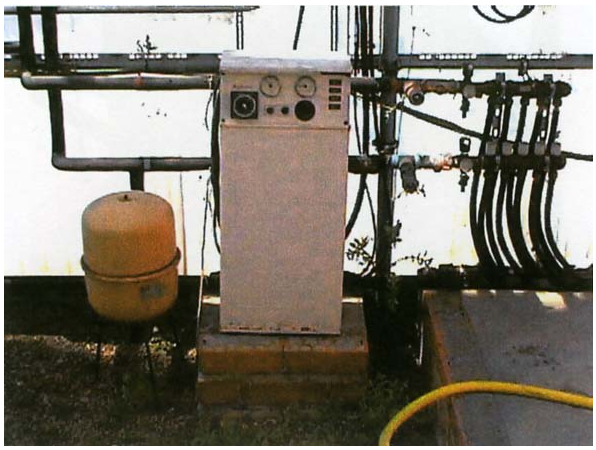


Figura 4.10. *Caldera eléctrica utilizada para calentar el agua que circula por las tuberías que constituyen el sistema de calefacción por suelo radiante.*

- **Aire caliente:** Aerotermos. Cuatro generadores eléctricos de aire caliente (dos en la parte frontal del invernadero y dos en la parte trasera, a una altura de 1.5 m), de 68.15 W m^{-2} cada uno. Su funcionamiento es independiente en grupos de dos, pudiendo aportar 136.3 ó 272.6 W m^{-2}.

  Cada aerotermo aporta 9 kW de potencia y produce un flujo de aire de 900 m^3 h^{-1}. En la Figura 4.11 se muestra el aspecto de los aerotermos.



Figura 4.11. *Generadores eléctricos de aire caliente o aerotermos.*

Los sistemas de calefacción se controlaban mediante interruptores horarios de acuerdo con las estrategias establecidas.

Las conexiones eléctricas y automatismos utilizados para accionar la apertura y cierre de las ventanas, extendido y plegado de la pantalla térmica y encendido y apagado de ambos sistemas de calefacción están en un cuadro eléctrico localizado en el interior del invernadero (*Fig.*4.12).

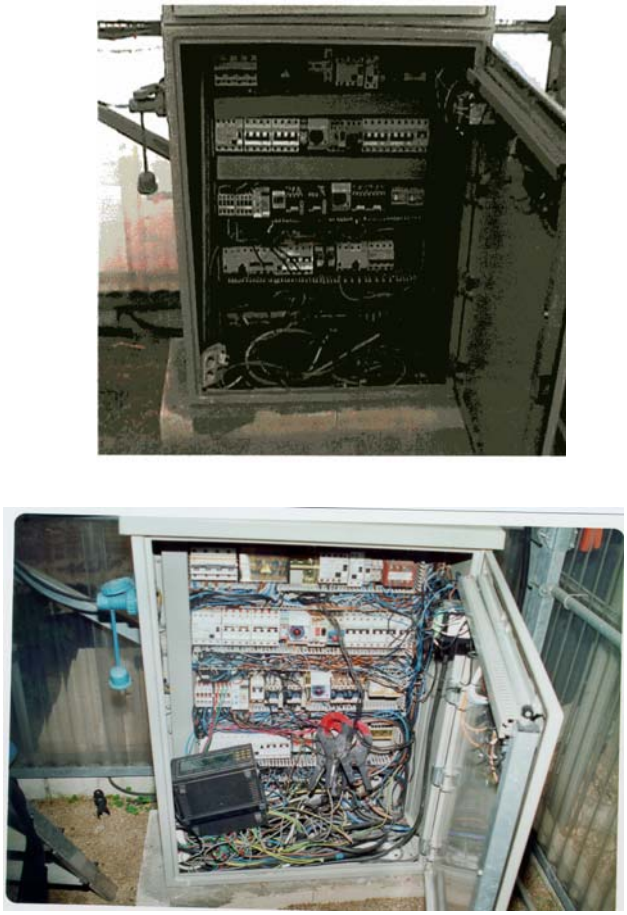


Figura 4.12. *Cuadro eléctrico con las conexiones eléctricas y automatismos utilizados para accionar ventanas, pantalla térmica y sistemas de calefacción.*

Se usaron dos sistemas de adquisición de datos (Datataker DT50) para almacenar los parámetros climáticos de dentro y fuera del invernadero. Los canales de sensores utilizados en cada uno de los datalogger fueron los siguientes:

- Datalogger 1 (cercano a la puerta de entrada)
    1. Radiación exterior.
    2. Temperatura exterior a una altura de 1.5 m.
    3. Humedad relativa interior a 3.2 m.
    4. Temperatura interior a 0.5 m.
    5. Temperatura interior a 1.5 m.
    6. Sensor de condensación.

- Datalogger 2 (al fondo del invernadero):
    1. Temperatura del suelo en la superficie del suelo radiante.
    2. Humedad relativa exterior a una altura de 4.5 m.
    3. Humedad relativa interior a 0.5 m.
    4. Temperatura del suelo a 45 mm de profundidad.
    5. Temperatura interior a 3.2 m.

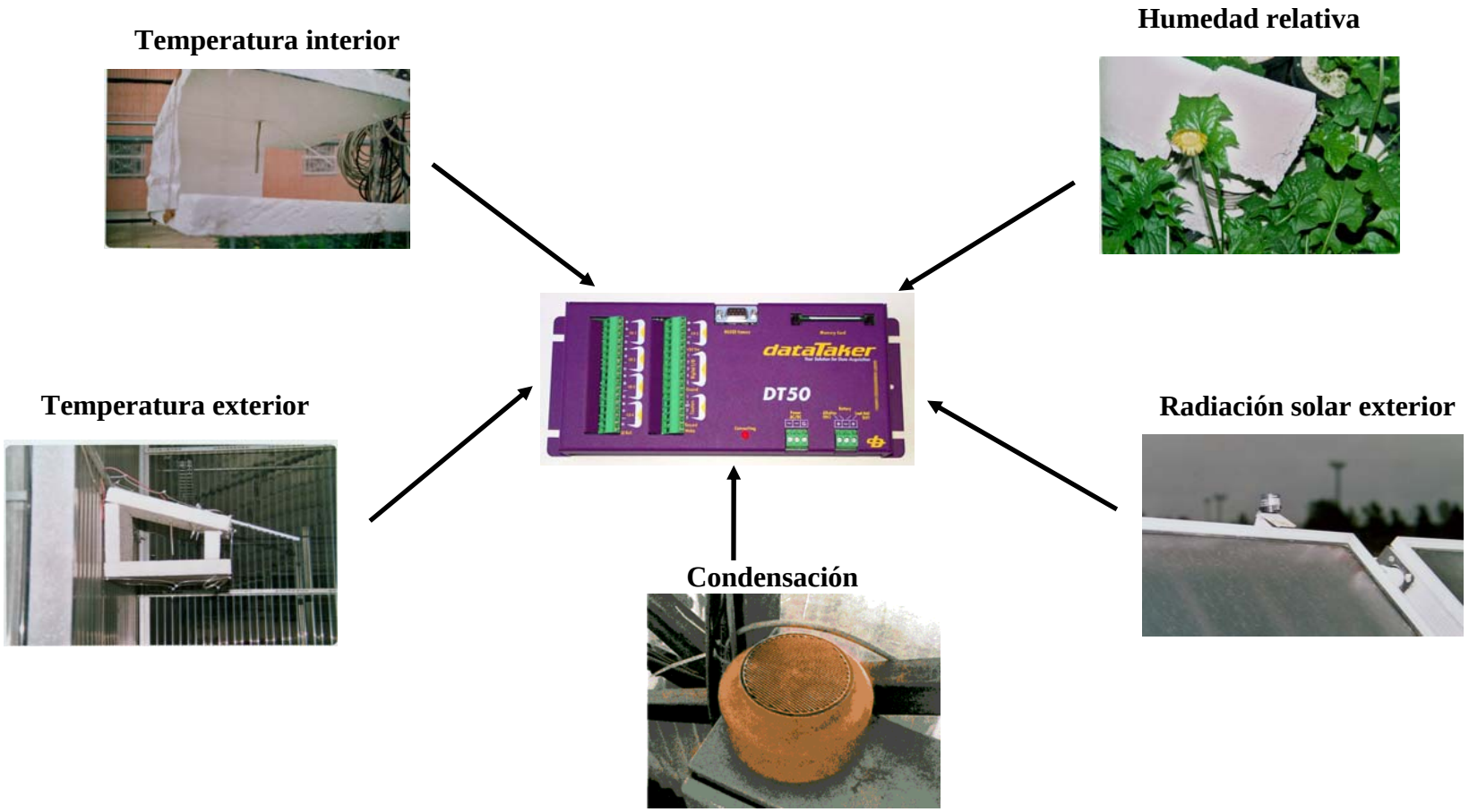
La temperatura del aire se midió en el centro del invernadero con sensores PT100, a tres alturas diferentes, 0.5 m, 1.5 m y 3.2 m respectivamente. La humedad relativa se midió con un sensor capacitivo a una altura de 0.5 m y en ocasiones también a 3.2 m en el interior del invernadero. La temperatura del suelo se midió también a distintas profundidades (a nivel del suelo de hormigón y a 45 mm de profundidad), con objeto de poder estudiar el perfil de temperaturas en el suelo cuando se utilizaba la calefacción por medio de suelo radiante.

Respecto a los parámetros climáticos exteriores; la radiación global se midió con un piranómetro “Skye Instruments”, y la temperatura exterior con una sonda PT100, a una altura de 1.5 m, y la humedad relativa con un sensor igual al instalado en el interior, colocado sobre la cumbrera del invernadero a 4.5 m del suelo.

Los sensores de temperatura (PT-100 a 4 hilos) se ubicaron dentro de jaulas de poliestireno, para evitar posibles interferencias en la lectura a causa de la incidencia directa de la radiación solar. La condensación se midió mediante un sensor de condensación constituido por pistas de cobre en paralelo sobre una base horizontal de plástico. El funcionamiento de este sensor se basa en que cuando una gota cae sobre estas pistas de cobre, se cierra un circuito eléctrico y se envía una señal digital al datalogger. Se registraron los valores medios de estas salidas digitales cada 5 minutos para determinar los periodos del día con mayores problemas de condensación.

Los distintos parámetros climáticos se registraron cada 5 minutos. Los valores medios diarios para el salto térmico (diferencia entre la temperatura interior del invernadero y la temperatura exterior), las distintas temperaturas y humedades relativas, condensación y coeficiente global de pérdidas U se calcularon en el período nocturno de 5:00 a 9:00 h. La ecuación utilizada para el cálculo de U se indica más adelante.

A continuación se muestra un esquema con los distintos sensores utilizados y el datalogger donde quedaban almacenados los datos para su posterior tratamiento.


Temperatura interior
Humedad relativa
dataTaker
DT50
Temperatura exterior
Radiación solar exterior
Condensación

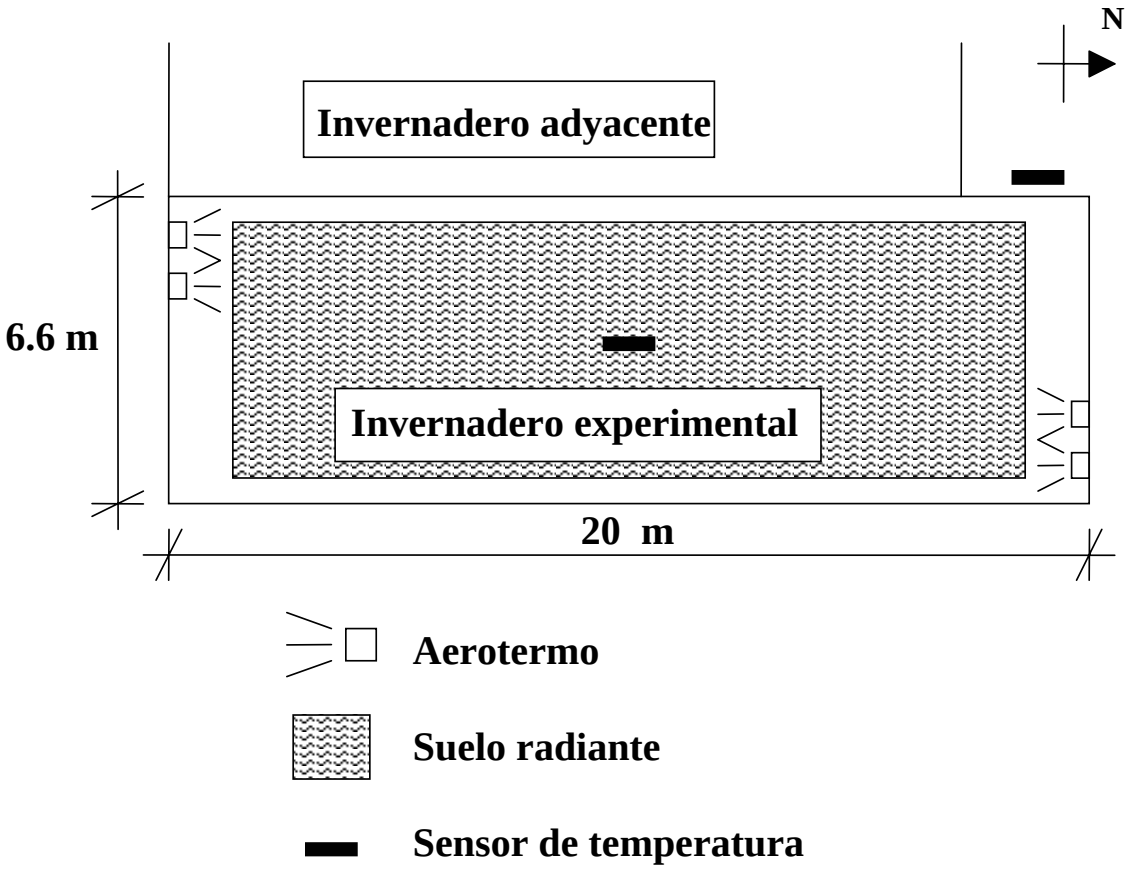


Figura 4.13. *Esquema de la planta del invernadero y disposición de los distintos sistemas de calefacción utilizados en los experimentos.*

4.2. ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN ENSAYADAS EXPERIMENTALMENTE

4.2.1 ESTUDIOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y ESTRATEGIAS CON AEROTERMOS

Así como es necesario mantener un control de temperatura, la regulación de la humedad dentro del invernadero también es importante, y un objetivo difícil, especialmente durante el invierno. Otro objetivo importante es evitar la condensación.

En una primera etapa, los estudios de esta tesis se centraron en un análisis estadístico que permitiera conocer qué combinación de equipos de calefacción permitía reducir la condensación que se producía dentro del invernadero. Los experimentos se realizaron durante la campaña de invierno, desde octubre de 2002 hasta abril de 2003 en un total de 50 días. Las combinaciones de equipos de climatización ensayadas, incluyendo suelo radiante, aerotermos y ventilación, se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Estrategias de calefacción estudiadas. Ventilación cenital nocturna de 5:00 a 9:00 h (en las estrategias que la incluyen).

1. Suelo radiante sin ventilación nocturna
2. Suelo radiante + ventilación cenital nocturna, apertura 8 cm
3. Suelo radiante + ventilación cenital nocturna, apertura 25 cm
4. Aerotermos sin ventilación nocturna
5. Aerotermos + ventilación cenital nocturna, apertura 25 cm

Las estrategias de referencia, suelo radiante sin ventilación nocturna y aerotermos sin ventilación nocturna, se compararon con otras estrategias en las que se aplicaba la ventilación nocturna, con diferentes grados de apertura de la ventana cenital.

Como puede observarse, en ninguna de las estrategias se ha considerado la utilización de pantalla térmica durante la noche como medio de ahorro energético. Se obtuvieron datos para las distintas estrategias tanto con pantalla térmica como sin ella, pero finalmente el estudio se centró en los casos en los que no se disponía de malla térmica, ya que eran los que podían tener mayor riesgo de condensación.

Cada estrategia se ensayó a lo largo de diferentes periodos de la campaña de calefacción para poder ser evaluada con diferentes condiciones de temperatura exterior.

En los análisis de varianza realizados se tuvieron en cuenta las siguientes variables: temperatura a 1.5 m y a 3.2 m de altura, la temperatura exterior, el salto térmico (diferencia entre la temperatura a 1.5 m y la temperatura exterior), la humedad relativa a 0.5 m y a 3.2 m de altura, la condensación producida y el coeficiente global de pérdidas de calor U.

El coeficiente U (parámetro utilizado en estudios anteriores para caracterizar la eficiencia energética) se calculó utilizando el valor de la calefacción media aplicada cada noche al invernadero, H (W m^{-2}), para 132 m^2 de superficie de suelo cubierta, la temperatura exterior, T_{ext} (ºC) y temperatura interior, $T_{int\ 1.5\ m}$ (ºC) medida a 1.5 m, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$U = H \Big/ (T_{\text{int}} - T_{ext}) \qquad \left(W m^{-2\ \text{o}} C^{-1}\right) \qquad [1]$$

Es importante destacar, que U incluye pérdidas por conducción, convección, infiltración y radiación proporcionales al salto térmico ($T_{int\ 1.5\ m} - T_{ext}$).

El aporte de calefacción H fue 113.60 W m^{-2} para las estrategias que utilizaban suelo radiante y 272.60 W m^{-2} para las estrategias de calefacción basadas en aerotermos.

Para llevar a cabo dichos análisis de varianza se utilizó el programa STATGRAPHICS. El objetivo fue comparar las diferentes estrategias de climatización para determinar si la ventilación, con diferentes grados de apertura, junto con un determinado sistema de calefacción podía influir en que hubiera una mayor o menor condensación dentro del invernadero. Para ello se utilizaron 10 días para cada estrategia ensayada, estudiando los datos registrados entre las 5:00 y las 9:00 h de la mañana, periodo en el que existe alto riesgo de condensación, y en el que se diferenciaban las estrategias comparadas.

4.2.2. ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

Con datos del mismo periodo que en el apartado anterior se trató de obtener un modelo de predicción de la condensación. Las estrategias de calefacción que utilizaban aerotermos no se tuvieron en cuenta para este modelo, ya que cuando se usaban aerotermos la condensación producida era muy reducida, salvo en determinadas condiciones muy limitantes. El mayor peligro de condensación se producía cuando se aplicaba calefacción por suelo radiante, debido probablemente a que el aire caliente queda localizado cerca del suelo y de la zona que rodea a la planta y, sin embargo, en el volumen de aire del invernadero más cercano al techo, la temperatura es inferior, y por tanto puede llegar a alcanzar la temperatura de rocío y condensarse sobre las superficies de paredes y cubierta.

Para el ajuste del modelo, se utilizaron distintas situaciones en el invernadero que combinaban la calefacción con la existencia o no de pantalla térmica nocturna y la existencia o no de ventilación nocturna, según se resume en la tabla siguiente:

Tabla 4.2. Combinaciones de equipamientos utilizadas en el ajuste del modelo. Campaña 2002/03.

Tipo Calefacción	Estrategia	Pantalla	Ventilación	n (días)
SUELO RADIANTE	1	No	Cenital y Lateral (100%) Diurna	**10**
	2	No	Cenital (8 cm) Nocturna Cenital (100%) Diurna	**12**
	3	No	Cenital (25 cm) Nocturna Cenital (100%) Diurna	**12**
	4	Sí (Nocturna)	Cenital y Lateral (100%) Diurna	**13**
	5	Sí (Nocturna)	Cenital (8 cm) Nocturna Cenital (100%) Diurna	**17**
	6	Sí (Nocturna)	Cenital (25 cm) Nocturna Cenital (100%) Diurna	**13**
SIN CALEFACCIÓN		No	Cenital (100%) Diurna	**19**

4.2.2.1. Ajuste del modelo

Los experimentos para el ajuste del modelo de predicción de la condensación se realizaron, para los casos en los que se aplicaba calefacción por medio de suelo radiante, en la campaña de invierno desde octubre de 2002 hasta enero de 2003. Para el modelo con el invernadero sin calefacción, el ajuste se realizó mediante datos registrados desde marzo hasta mayo de 2003. Los dos modelos (con calefacción por suelo radiante y sin calefacción) se realizaron por separado; se utilizaron 77 días para el primer modelo y 19 para el segundo).

La génesis del modelo se basó en primer lugar en el análisis de la existencia o no de correlaciones entre diferentes parámetros climáticos en los casos en los que existía condensación y en aquellos en los que no existía condensación:

- Salto térmico (temperatura a 3.2 m – temperatura exterior).
- Salto térmico (temperatura a 1.5 m – temperatura exterior).
- Temperatura a 1.5 m.
- Temperatura a 3.2m.
- Temperatura de rocío a 1.5 m.
- Temperatura de rocío a 3.2 m.

- Humedad relativa a 0.5 m.
- Humedad relativa a 3.2 m.

Se trataba de buscar zonas significativas de la existencia de condensación para formular el modelo con los parámetros climáticos más representativos.

Tras analizar la existencia o no de significación de estas variables, se plantearon distintas combinaciones de éstas para la formulación del modelo de predicción de la condensación con el programa STATGRAPHICS aplicando un análisis de regresión logística.

La regresión logística

El análisis de regresión logística permite estimar modelos de regresión múltiple cuando la respuesta que se está modelando es dicotómica y puede tomar los valores de 0 ó 1, es decir, el valor de salida del modelo debe ser una de esas dos posibilidades. Este tipo de análisis es útil cuando se quiere modelar una variable que puede expresarse como ocurre/no ocurre o algo que tenga dos posibilidades de respuesta. La transformación logística establece la base para el modelo logístico lineal.

Es ideal en el momento en que restringe las predicciones al intervalo (0,1), que es apropiado para proporciones y puede transformarse fácilmente en una forma lineal. La función va tomando un perfil de curva S que es monótona creciente o monótona decreciente. Para el caso de la medida de condensación, el sensor instalado en el invernadero de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid objeto de esta tesis, registraba medidas de unos y ceros en función de si existía o no condensación para el periodo de estudio considerado (periodos registrados cada 5 minutos).

El programa STATGRAPHICS Plus permite utilizar datos de respuestas dicotómicas en cualquiera de las dos formas:

La variable dependiente puede consistir en observaciones individuales de valor 0 ó 1, representando la salida corriente para cada caso individual.

La variable dependiente puede contener probabilidades entre 0 y 1 que son las proporciones de éxito para grupos de observaciones, cuyos tamaños pueden variar.

Las variables independientes o explicatorias pueden ser o bien categóricas (discretas) o bien continuas. El programa crea variables indicadores para factores categóricos que pueden simplificar el uso del modelo para realizar predicciones para casos futuros.

Para poder interpretar el resultado del modelo de regresión logística se debe recurrir al concepto de 'ODDS', una de las medidas de las que se dispone para poder cuantificar el riesgo.

De esta forma el parámetro 'ODDS' se define como el cociente de la probabilidad de presentar una característica y la probabilidad de no presentarla, o lo que es lo mismo el cociente del número de casos que presentan la característica entre el número de casos que no la presentan.

$$ODDS = p / (1-p) \qquad [2]$$

Se pueden comparar dos ODDS, por ejemplo entre la existencia de condensación cuando se presenta una determinada condición y cuando no se presenta, en forma de cociente de ambas, OR, (denominada ratio ODDS), de manera que se puede concluir si por ejemplo la condensación o fenómeno estudiado es más frecuente en aquellas situaciones que presentan dicha característica o en aquellas que no la presentan.

Se puede demostrar que los coeficientes obtenidos en la regresión logística, β_i, son medidas que cuantifican el riesgo de presentar cierta característica respecto a no presentarla en base a la variable de estudio, de manera que:

$$\text{Exp}(\beta_i) = \text{OR} \qquad [3]$$

β_i es el coeficiente resultado de la regresión logística asociado a una cierta variable participante en el modelo. Cuando la variable independiente tratada es numérica, el coeficiente asociado a dicha variable se interpreta como el ODDS ratio de que ocurra el suceso para cada incremento de la variable independiente, manteniendo constante el resto de variables independientes.

Lo verdaderamente importante del modelo de regresión logística es que pueden analizarse conjuntamente varios factores o variables para ver cómo afectan a la variable dependiente dicotómica.

En regresión logística, para estimar los valores de los coeficientes, se utiliza el método de máxima verosimilitud (*maximum likelihood*), que consiste en hallar los valores que hacen más verosímil la probabilidad de producirse condensación en los casos en los que realmente se produce y la probabilidad de no existir condensación en los casos en los que ésta no existe.

Estos valores se definen mediante una función de verosimilitud, que interesa que sea lo más grande posible; habitualmente se trabaja con el logaritmo neperiano de la verosimilitud (*log likelihood*), que es la función que hay que maximizar.

Siempre que se construye un modelo de regresión es fundamental, antes de pasar a extraer conclusiones, el corroborar que el modelo calculado se ajusta efectivamente a los datos usados para estimarlo.

En el caso de la regresión logística una idea bastante intuitiva es calcular la probabilidad de aparición del suceso, aparición de condensación en el caso de esta tesis, para todos los datos muestreados.

Por tanto, resaltar que en la regresión logística, el objetivo primordial que se resuelve es el de cuantificar cómo influye en la probabilidad de aparición de un suceso, habitualmente dicotómico, la presencia o no de diversos factores y el valor o nivel de los mismos.

A continuación se resumen las combinaciones ensayadas, indicando qué variables climáticas se tuvieron en cuenta para la obtención del modelo en cada combinación:

Tabla 4.3. Combinaciones ensayadas para el ajuste del modelo en las estrategias sin calefacción y con calefacción por suelo radiante.

Variable / Comb	$HR_{int\ 0.5m}$	$HR_{int\ 0.5m} - HR_{ext}$	HR_{ext}	$T_{int\ 3.2m} - T_{ext}$	$T_{rocio\ 3.2m}$	$T_{int\ 3.2m} - T_{rocio\ 3.2m}$	$HR_{int\ 3.2m} - HR_{int\ 0.5m}$	$T_{int\ 3.2m} - T_{int\ 1.5m}$
A	•			•				
B	•					•		
C	•				•			
D	•					•		•
E	•			•			•	
F	•			•		•		
G	•		•	•		•		
H	•	•				•		•
I	•			•		•		•
J	•			•		•	•	

Para la construcción del modelo de regresión, el programa STATGRAPHICS devuelve un valor denominado "*eta*", que se define como una combinación lineal de los distintos parámetros climáticos tenidos en cuenta para cada una de las combinaciones planteadas.

Un ejemplo de los coeficientes β_i de dicha combinación lineal obtenidos se muestra en la siguiente tabla (en concreto corresponde a los coeficientes del modelo de ajuste para la combinación F cuando el invernadero tiene calefacción por suelo radiante):

Modelo de regresión logística estimado (*Maximun likelihood*): **COMB F**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Odds Ratio estimado
Constante	***-25.1115***	1.18797	
$T_{int\ 3.2\ m}$ - T_{ext}	***0.343298***	0.0119919	1.40959
$HR_{int\ 0.5\ m}$	***0.211862***	0.011508	1.23598
$T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}$	***0.616882***	0.0504861	1.85314

Análisis de desviación

Fuente	Desviación	Df	P-Value
Modelo	2225.11	3	0.0000
Residual	12624.1	22033	1.0000
Total (Corr.)	14849.2	22036	

Porcentaje de desviación explicado mediante el modelo = ***14.9848***

Por ejemplo, para la combinación F de la Tabla 4.3, el programa calcula unos coeficientes $\beta_1, \beta_2, \beta_3\ y\ \beta_4$ de manera que la variable "*eta*" quedaría definida de la siguiente forma:

$$eta = -25.1115 + 0.2118 * HR_{int\ o.5\ m} + 0.3432 * (T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}) + 0.6168 * (T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocío\ 3.2\ m})$$

A partir de esta variable, el modelo que propone STATGRAPHICS para el cálculo de la probabilidad de condensación producida responde a la fórmula:

$$C = \exp(eta) \Big/ (1+\exp(eta)) \qquad [4]$$

Una vez obtenidos los modelos de regresión con las combinaciones de parámetros climáticos mostrados en la Tabla 4.3, se eligieron las cuatro mejores combinaciones. La forma de elegir un modelo de regresión frente a otro que presente igual o distinto número de variables climáticas tomadas como variables independientes, es el valor de porcentaje de desviación explicado por el modelo.

Cada uno de los cuatro modelos elegidos se aplicó a todos los datos del periodo de ajuste en estudio, tomados cada 5 minutos, y se obtuvo un valor de condensación simulada, con valores dentro del intervalo [0,1], que sería el indicador de la probabilidad de condensación.

Se define una nueva variable de condensación, la condensación simulada corregida, C_c. Hecho esto, para reducir el error medio de aplicabilidad del modelo, se estimó el valor de la probabilidad de condensación, C, a partir del cual al valor de condensación obtenido con el modelo (C) se le asociaba un valor de condensación corregida (C_c) de uno (existe condensación) y por debajo del cual el valor de condensación corregida se igualaba a cero (no existe condensación).

Para establecer este valor de referencia (o valor de corte entre la aparición y no aparición de condensación), se representaron las gráficas de condensación real frente a condensación simulada con el modelo para cada día del periodo considerado.

Este valor de referencia para el cálculo de la condensación simulada se calculó de forma que el error en la predicción de la condensación fuera mínimo.

El programa STATGRAPHICS devuelve una tabla de valores de corte con el % de casos en que existe condensación real y el modelo acierta y el % de casos en los que no existe condensación real y el modelo acierta. Se eligen aquellos valores de corte que muestren unos porcentajes aceptables para ambos casos.

Con este valor de referencia se consigue tener valores de 0 ó 1 para la condensación simulada corregida y poder así compararla con los datos de condensación real obtenidos a partir del sensor de condensación instalado.

Finalmente, para comparar la condensación real con la simulada, se representó el día medio de todo el periodo estudiado para cada caso (con calefacción y sin calefacción).

4.2.2.2. Validación del modelo

Los experimentos para la validación del modelo de predicción de la condensación se realizaron, para los casos en los que se aplicaba calefacción por medio de suelo radiante, en la campaña de primavera, de marzo a mayo de 2003, así como durante el invierno, de enero a febrero de 2004.

Para el invernadero sin calefacción, la validación del modelo de condensación se realizó a partir de datos registrados desde septiembre a diciembre de 2003.

Una vez obtenidos en el ajuste los cuatro modelos de regresión con los mayores porcentajes de desviación explicados por el modelo, con sus correspondientes combinaciones de parámetros climáticos, se aplicó el modelo para los datos de validación y se obtuvo un valor de condensación simulada comprendido dentro del intervalo [0,1].

Para la validación del modelo, se utilizaron distintas situaciones en el invernadero que combinaban la calefacción o no calefacción con la existencia de ventilación diurna al 100% (70 cm de apertura de ventana cenital), según se resume en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Combinaciones de equipamientos utilizadas en la validación del modelo. Campaña 2003/04.

Tipo Calefacción	*Pantalla*	*Ventilación*	*n (días)*
SUELO RADIANTE	No	Cenital y Lateral (100%) Diurna (Conjunto heterogéneo: Casos sin ventilación nocturna y casos con ventilación nocturna apertura cenital de 8 cm y de 25 cm)	24
SIN CALEFACCIÓN	No	Cenital y Lateral (100%) Diurna	18

Análogamente a como se realizó en el ajuste de los distintos modelos, se calculó la variable condensación simulada corregida, C_c, a partir de los correspondientes valores de corte o referencia.

Para comparar la condensación real con la simulada y evaluar el modelo aplicado sobre los datos de validación, se calculó el día medio de todo el periodo estudiado tanto en el caso de situación del invernadero con calefacción por suelo radiante como en el caso del invernadero sin calefacción.

5. RESULTADOS

5. RESULTADOS

5.1. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A LA CONDENSACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y CON AEROTERMOS

Los resultados del análisis de varianza realizado para las estrategias de climatización se muestran en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1. Análisis de varianza para las estrategias de calefacción 1, 2, 3, 4 y 5. Años 2002-2003. Número total de días del análisis: 50.

Variable / Experimento	$T_{int\ 1.5\ m}$ (ºC)	$T_{int\ 3.2\ m}$ (ºC)	T_{ext} (ºC)	$T_{int\ 1.5\ m} - T_{ext}$ (ºC)	$HR_{int\ 0.5\ m}$ (%)	$HR_{int\ 3.2\ m}$ (%)	Condensación (% en tiempo)	U (W m^{-2} $ºC^{-1}$)
1	15.24	15.29	9.77	5.46	100	100	30	21.62
	b	bc	c	a	c	b	bc	bc
2	14.14	13.98	8.79	5.35	96.37	99.79	39	22.42
	ab	ab	c	a	b	b	c	bc
3	12.78	12.69	8.04	4.74	100	100	8	24.23
	a	a	bc	a	bc	b	a	c
4	15.92	17.50	2.53	13.39	72.76	58.71	13	13.18
	b	d	a	c	a	a	ab	a
5	15.15	16.18	5.39	9.75	66.27	61.91	0	19.65
	b	cd	b	b	a	a	a	b

En la tabla puede observarse que con aerotermos se consigue disminuir la humedad relativa dentro del invernadero, porque cuando el sistema de calefacción es por medio de suelo radiante, el invernadero llega prácticamente a la saturación.

El coeficiente de pérdidas de calor, U, es menor cuando se utilizan aerotermos. En este resultado influye que la medida de la temperatura interior se realiza a 1.5 m de altura; el suelo radiante calienta fundamentalmente el primer metro en altura.

En cuanto a la condensación, ésta es mayor en las estrategias 1 y 2. Dentro de las estrategias con suelo radiante, la que tiene una ventilación cenital nocturna con grado de apertura de 25 cm, tiene una condensación menor, con un valor del 8%.

Las estrategias que utilizan aerotermos, tienen una condensación menor, y dentro de éstas, se consigue una reducción no significativa de la condensación cuando se realiza ventilación nocturna con 25 cm de grado de apertura. Con esta última estrategia, la condensación prácticamente se anula.

En la Figura 5.1 se representa la temperatura interior del invernadero (ºC), medida a 1.5 m, para dos de las estrategias de calefacción ensayadas que utilizan suelo radiante, la estrategia 1 sin ventilación nocturna y la estrategia 3 con ventilación nocturna (grado de apertura de 25 cm). En la gráfica puede observarse como cuando se tiene ventilación nocturna, la temperatura interior del invernadero es inferior a cuando no existe ventilación (2-3ºC menos).

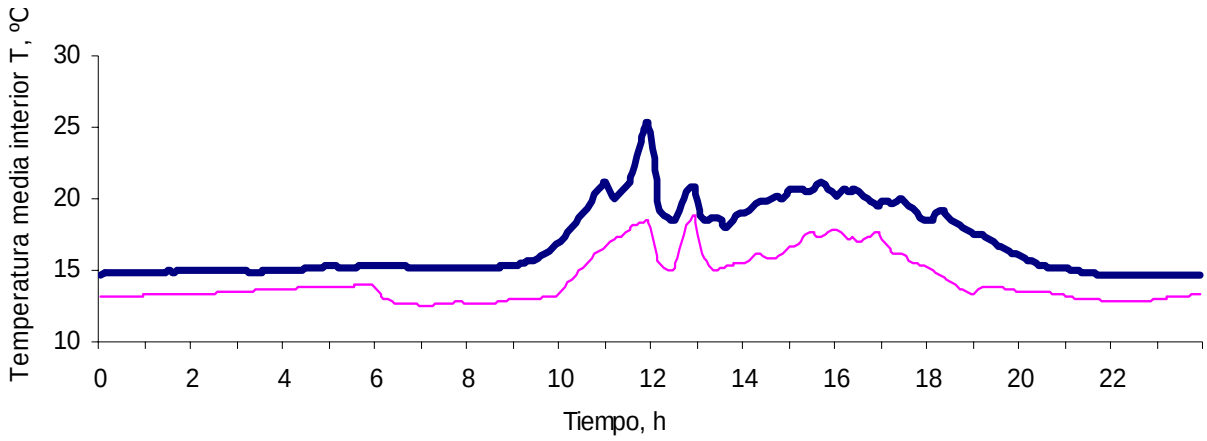


Figura 5.1. *Gráfica comparativa de la temperatura media interior del invernadero, medida a 1.5 m (ºC) a lo largo de un día medio para las estrategias de calefacción 1(——) y 3(——).*

En la Figura 5.2 se representa la condensación producida dentro del invernadero (% de tiempo) a lo largo de un día medio para las estrategias de calefacción 1 y 3. En este caso también se observa que se produce una reducción de la condensación cuando la calefacción por suelo radiante se complementa con una ventilación nocturna.

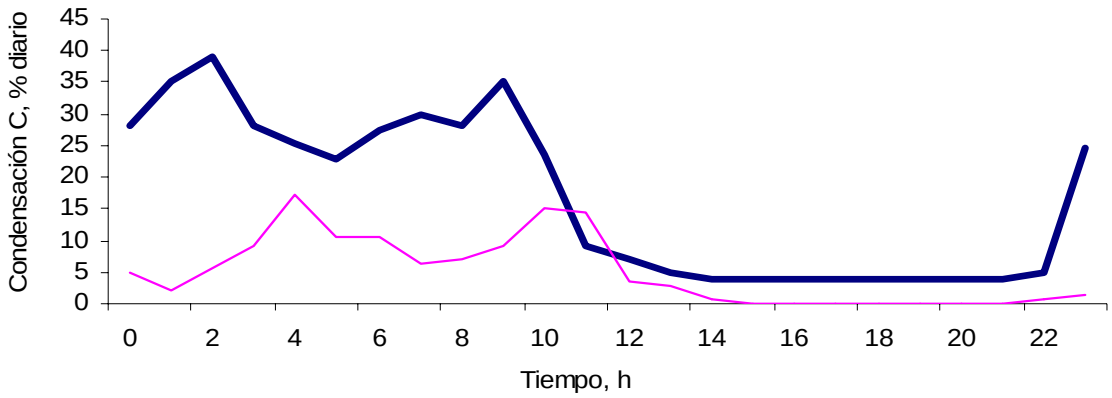


Figura 5.2. *Gráfica comparativa de la condensación (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para las estrategias de calefacción 1(——) y 3(——).*

5.2. OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

5.2.1. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN

A continuación se muestra una de las gráficas representativas obtenida en el estudio de las correlaciones entre diferentes parámetros climáticos, en concreto para la humedad relativa en el interior del invernadero medida a 0.5 m y la temperatura interior medida a 1.5 m de altura, para el periodo completo en el que el invernadero no disponía de ningún sistema de calefacción.

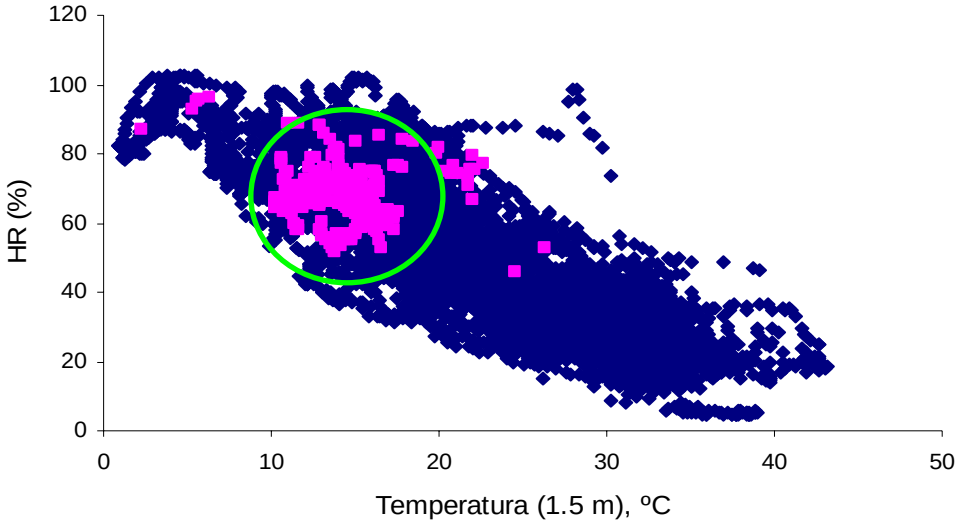


Figura 5.3. *Humedad relativa en el interior del invernadero (%) en función de la temperatura interior del invernadero medida a 1.5 m (ºC) cuando no existe condensación (◆) y cuando se produce condensación (■) para el conjunto de datos en los que el invernadero no utilizaba calefacción por suelo radiante. Datos registrados cada 5 minutos.*

Como puede observarse en la Figura *5.3*, el conjunto de datos en los que se produce condensación durante el periodo correspondiente a la situación del invernadero sin calefacción, se agrupa en torno a un punto medio del 70% de humedad relativa y 13ºC de temperatura en el interior del invernadero medida a 1.5 m de altura.

De todas las combinaciones de parámetros climáticos ensayadas en la Tabla 4.3 (pág. 148), se eligieron las cuatro mejores, aquellas que presentaban un mayor porcentaje de desviación explicado por el modelo (parámetro obtenido en el análisis de regresión logística).

Se buscaron modelos que incluyeran distinto número de variables independientes (parámetros climáticos) con el objetivo de llegar a modelos sencillos de aplicación en programas de control climático para invernaderos. Entre dos modelos con similar porcentaje de desviación explicado, se elegiría el que dependiera de menor número de parámetros climáticos.

Para la estrategia de referencia en la que el invernadero no disponía de ningún sistema de calefacción, las cuatro mejores combinaciones resultaron la C, D, H e I.

En la Tabla 5.2 se resumen los parámetros climáticos considerados en cada una de las combinaciones ensayadas.

Tabla 5.2. Resumen de las combinaciones ensayadas para la situación del invernadero sin calefacción

Variable / Comb	$HR_{int\ 0.5\ m}$	$HR_{0.5\ m} - HR_{ext}$	$T_{int\ 1.5\ m} - T_{ext}$	$T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}$	$T_{rocio\ 3.2\ m}$	$T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m}$
C	•				•	
D	•			•		•
H	•	•		•		•
I	•		•	•		•

Según la tabla, los parámetros climáticos más representativos para la obtención de los modelos fueron la humedad relativa interior a 0.5 m, la humedad relativa exterior, las temperaturas interiores del invernadero a 1.5 m y 3.2 m de altura y la temperatura de rocío a 3.2 m.

Mediante el análisis de regresión logística, los modelos matemáticos obtenidos para los modelos de ajuste de las estrategias que no utilizan ningún sistema de calefacción responden a las siguientes fórmulas (Tabla 5.3):

Tabla 5.3. Modelos de condensación para estrategias sin calefacción. Presencia de condensación si exp(eta)/(1 + exp(eta)) > valor de corte.

COMB	Valor de corte	MODELO DE CONDENSACIÓN: *exp(eta)/(1 + exp(eta))*
C	*0.175*	$eta = -2.671 + 0.022*HR_{int\ 0.5\ m} - 0.212*T_{rocio\ 3.2\ m}$
D	*0.293*	$eta = 91.559 - 0.955*HR_{int\ 0.5\ m} - 4.688*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}) + 0.323*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m})$
H	*0.328*	$eta = 102.165 - 1.077*HR_{int\ 0.5\ m} - 5.195*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}) + 0.371*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m}) + 0.030*(HR_{int\ 0.5\ m} - HR_{ext})$
I	*0.284*	$eta = 98.462 - 1.016*HR_{int\ 0.5\ m} - 5.031*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}) + 0.555*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m}) - 0.226*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext})$

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la condensación simulada corregida, $C_{c,}$ a partir de la probabilidad de condensación simulada mediante el modelo de regresión, C, correspondiente a la combinación C. Los datos de las variables climáticas registradas mediante sensores en el invernadero son los siguientes:

a) <u>Resultado de la simulación: sin condensación</u>

$HR_{int\ 0.5\ m} = 86.02\%$;

$T_{rocío\ 3.2\ m} = 9.8^{o}C$

$eta = -2.671 + 0.022*HR_{int\ 0.5\ m} - 0.212*T_{rocio\ 3.2\ m} \rightarrow$ ***eta = –2.8563***

Probabilidad de condensación según el modelo:

$C = exp(eta)/(1 + exp(eta)) \rightarrow$ ***C = 0.0543*** $\rightarrow$ ***C_c = 0***

Para el cálculo de la condensación corregida, C_c, el primer criterio a estudiar es si la $HR_{int\ 0.5\ m}$ es igual a 100%. En ese caso, razonando desde un punto de vista fisico, existe condensación y por tanto la condensación corregida, C_c se igualaría a 1.

En caso de tener valores de $HR_{int\ 0.5\ m}$ inferiores al 100%, se estudia el valor obtenido para la condensación simulada, C, según la ecuación del modelo correspondiente. En este caso concreto $HR_{int\ 0.5\ m} < 100\%$ y el valor de condensación simulada obtenida con el modelo es de 0.0543.

Al ser el valor de corte o referencia para este modelo igual a 0.175, como la condensación simulada para estas condiciones concretas es inferior al valor de corte, a la condensación simulada corregida, C_c, se le asigna un valor de cero. No hay condensación.

b) Resultado de la simulación: con condensación

$HR_{int\ 0.5\ m} = 74.20\%$;

$T_{rocío\ 3.2\ m} = 1.55^{o}C$

$eta = -2.671 + 0.022 * HR_{int\ 0.5\ m} - 0.212 * T_{rocio\ 3.2\ m} \rightarrow$ ***eta = –1.3670***

Probabilidad de condensación simulada según el modelo:

$C = exp(eta)/(1 + exp(eta)) \rightarrow$ ***C = 0.2031*** $\rightarrow$ ***C_c = 1***

Al ser el valor de corte o referencia para este modelo igual a 0.175 (Tabla 5.3), como la condensación simulada C, para estas condiciones concretas es superior al valor de corte, a la condensación simulada corregida, Cc, se le asigna un valor de uno. Sí existe condensación.

En la Tabla 5.4 se resumen los datos del número de días en los que existió o no tanto condensación real como simulada con el modelo, para cada una de las combinaciones:

Tabla 5.4. Número de días en los que existió o no tanto condensación real como simulada por el modelo en las estrategias sin calefacción.

	Nº DÍAS CONDENSACIÓN		
COMB	**Simulada / Real**	**Si**	**No**
C	**Si**	9	1
	No	4	5
D	**Si**	3	7
	No	5	4
H	**Si**	5	5
	No	6	3
I	**Si**	3	7
	No	4	5

Así, por ejemplo, para la combinación C existió condensación real en 10 días, de los cuales, el modelo obtuvo como resultado la existencia de condensación en 9 de ellos y la no existencia de condensación tan sólo en 1.

Calculando el día medio para cada combinación y representando la gráfica de condensación real frente a simulada, se obtuvieron los siguientes resultados:

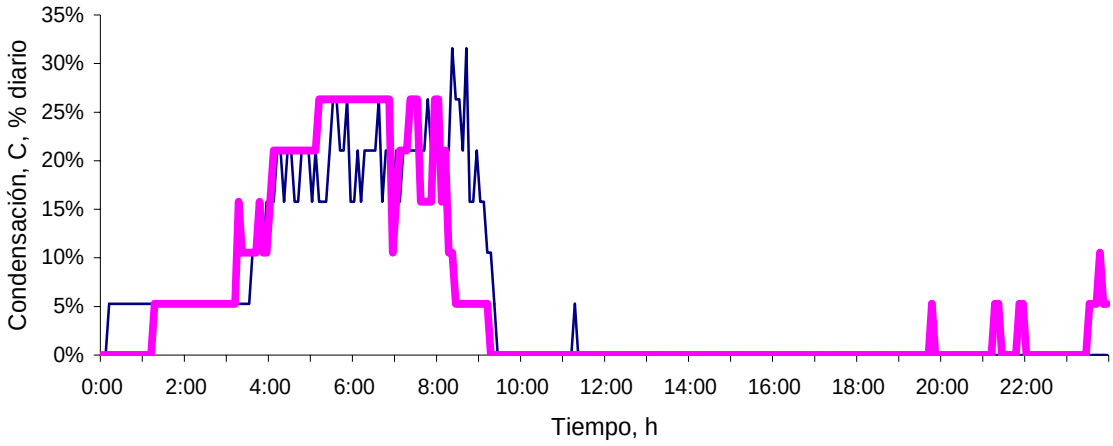


Figura 5.4. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación C en situación del invernadero sin calefacción.*

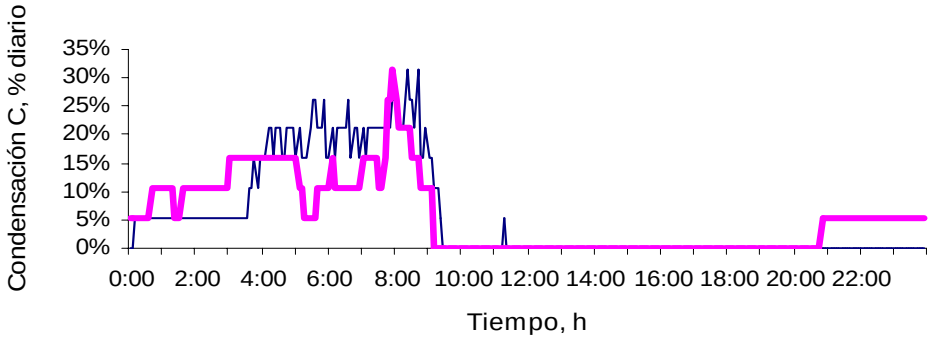


Figura 5.5. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación D en situación del invernadero sin calefacción.*

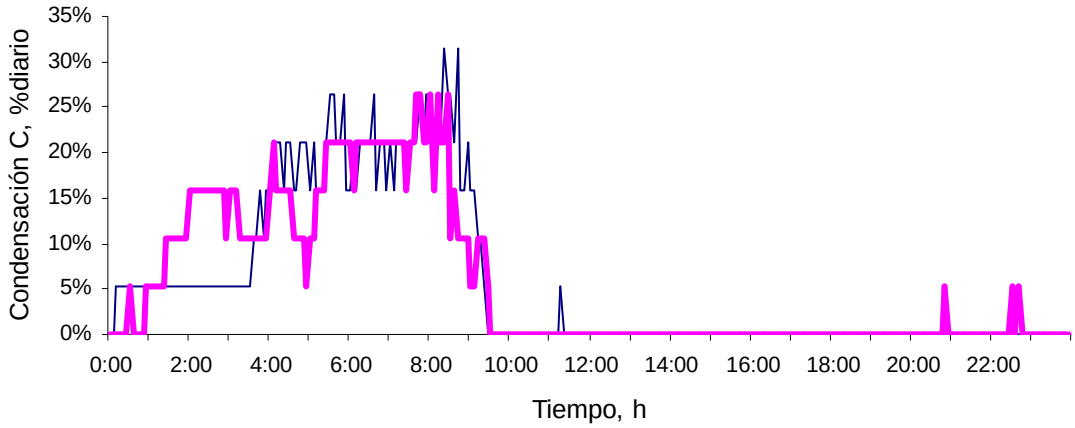


Figura 5.6. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación H en situación del invernadero sin calefacción.*

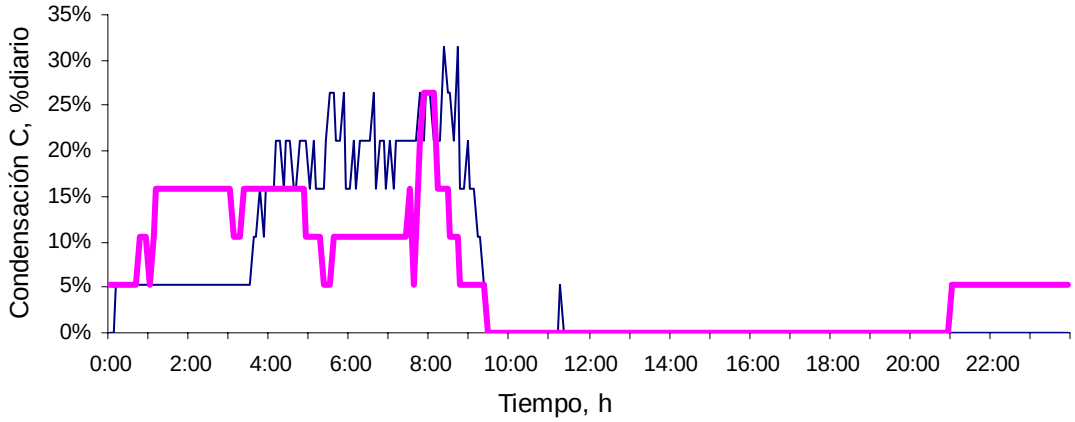


Figura 5.7. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación I en situación del invernadero sin calefacción.*

Como puede observarse en las gráficas, de las cuatro combinaciones, las dos en las que el modelo se ajusta más a los datos reales son la C y la H.

La combinación H es la de mayor porcentaje de desviación explicado por el modelo (40.8), y la combinación C tiene como porcentaje de desviación 31.3 (Tabla 5.5).

La combinación D tiene un porcentaje de desviación explicado por el modelo de 33.2 y la combinación I tiene un porcentaje de desviación de 34.4. Estos valores están muy cerca del valor correspondiente a la combinación C, por tanto se elegiría ésta ya que el modelo depende de un menor número de variables climáticas independientes y por tanto, se llega a una mayor simplicidad del modelo.

Tabla 5.5. Porcentajes de desviación explicados por los modelos estadísticos obtenidos por regresión logística. Modelos de ajuste en situación del invernadero sin calefacción.

Modelo	% Desviación explicado por el modelo
C	**31.3068**
D	33.1596
H	**40.8013**
I	34.4329

Los modelos obtenidos por regresión logística se ajustan bien a la realidad, ya que para todas las combinaciones, no existe condensación simulada a partir de las 10:00 h a.m.
De hecho, el mayor riesgo de condensación se produce durante la madrugada y a primeras horas de la mañana, en las que el invernadero está más frío y cargado de humedad.

De hecho, entre la combinación C y la H, se justifica el elegir como mejor modelo en el ajuste el correspondiente a la combinación C, ya que la ecuación de este modelo es más coherente con la realidad, es decir, sus coeficientes reproducen mejor las condiciones físicas en las que se produce condensación real en el invernadero, en función del

aumento o disminución de los valores de las variables climáticas independientes implicadas.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las probabilidades de condensación diaria tanto real como simulada por los distintos modelos de ajuste en situación del invernadero sin calefacción.

Tabla 5.6. Probabilidad de condensación real y simulada por los distintos modelos medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9h. Modelos de ajuste en situación del invernadero sin calefacción.

Modelo	Condensación	
	Durante todo el día	Periodo 5-9 h
Real	6%	**21%**
C	6%	**16%**
D	6%	14%
H	6%	**19%**
I	6%	12%

Según puede observarse en las gráficas, la condensación real y la condensación simulada alcanzan sus máximos valores en el periodo de 5:00 h a 9:00 h a.m.

Según la Tabla 5.6, el valor de condensación real media alcanzado es del 21% y los valores de condensación simulada media son del 16% para la combinación C y del 19% para la combinación H. Por tanto, se validarán las dos combinaciones, la combinación C por la obtención de un modelo más simple, y la combinación H, ya que el 19% obtenido en el periodo de 5-9 h se acerca más a los valores reales en dicho periodo.

La probabilidad de condensación media tanto real como simulada por los distintos modelos, medida a lo largo de todo el día medio es del 6% en este periodo sin calefacción.

Las tablas obtenidas en el análisis de regresión logística para el modelo correspondiente a la combinación C son las siguientes:

Modelo de regresión logística estimado (*Maximum likelihood*): **Combinación C.**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Odds Ratio estimado
Constante	-2.67079	0.244135	
$HR_{int\ 0.5\ m}$	0.0219894	0.00362368	1.02223
$T_{rocio\ 3.2\ m}$	-0.211832	0.0168514	0.809101

Análisis de desviación

Fuente	Desviación	Df	P-Value
Modelo	336.178	2	0.0000
Residual	1994.93	5469	1.0000
Total (Corr.)	2331.1	5471	

Porcentaje de desviación explicado mediante el modelo = **31.3068**

5.2.2. RESULTADOS DEL AJUSTE DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN

A continuación se muestra una de las gráficas representativas de las zonas de existencia de condensación, obtenida en el estudio de las correlaciones entre diferentes parámetros climáticos, en concreto para la humedad relativa en el interior del invernadero medida a 0.5 m y la temperatura interior medida a 1.5 m de altura, para el periodo completo en el que el invernadero disponía de calefacción por medio de suelo radiante.

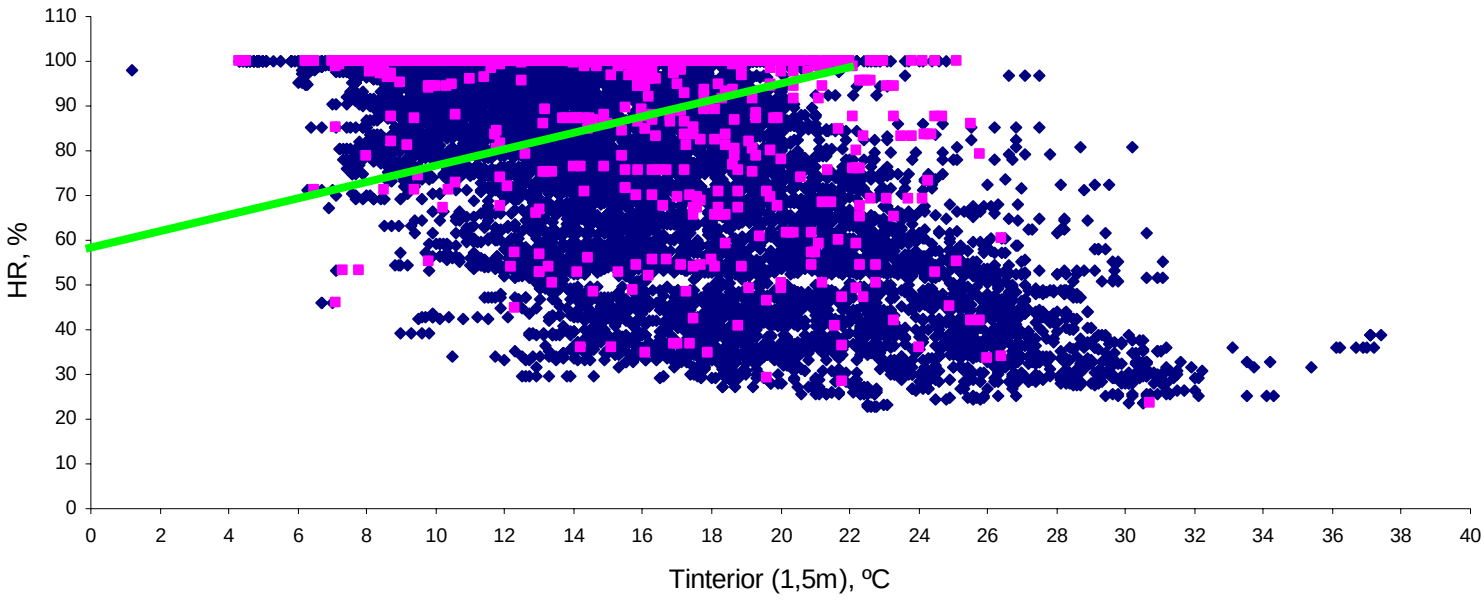


Figura 5.8. *Humedad relativa en el interior del invernadero (%), medida a 0.5 m en función de la temperatura interior del invernadero medida a 1.5 m (ºC) cuando no existe condensación (◆) y cuando se produce condensación (■) para el conjunto de datos en los que el invernadero estaba dotado de calefacción por suelo radiante. Datos registrados cada 5 minutos.*

En la *Fig. 5.8* se observa que, cuando el invernadero estaba dotado de calefacción por suelo radiante, como era de esperar, la mayor parte de los casos en los que se ha producido condensación coincide con humedades relativas altas y temperaturas bajas.

En concreto, una gran parte de la nube de puntos se encuentra para humedades superiores al 70% y temperaturas del invernadero por debajo de los 20ºC. Cuando la humedad relativa es del 100%, el aire del invernadero está saturado de vapor, y las probabilidades de producirse condensación cuando la temperatura del aire interior se acerca a la temperatura de rocío son mucho mayores.

Cabe señalar que, en las figuras *5.3 y 5.8* los puntos correspondientes a condensación cero o no existencia de condensación (en azul) y los correspondientes a condensación uno o existencia de condensación (en rosa) se solapan en muchas zonas. Esto se debe a que se está tratando con un conjunto heterogéneo de datos, que agrupan diferentes estrategias de control climático del invernadero aplicadas con condiciones climáticas diversas.

De todas las combinaciones ensayadas en la Tabla 4.3 (pág. 148), se eligieron las cuatro mejores combinaciones, aquellas que presentaban un mayor porcentaje de desviación explicado por el modelo (parámetro obtenido en el análisis de regresión logística).
Para las estrategias que utilizaban suelo radiante como sistema de calefacción, las cuatro mejores estrategias resultaron la A, F, G e I.

En la Tabla 5.7 se resumen los parámetros climáticos considerados en cada una de las combinaciones ensayadas.

Tabla 5.7. Combinaciones de parámetros climáticos en las cuatro mejores combinaciones. Estrategias con calefacción.

Variable / Comb	$HR_{int\ 0.5\ m}$	HR_{ext}	$T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}$	$T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}$	$T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m}$
A	•		•		
F	•		•	•	
G	•	•	•	•	
I	•		•	•	•

Interpretando los resultados del análisis de regresión logística, los modelos matemáticos de ajuste obtenidos para las estrategias que utilizan calefacción por suelo radiante responden a las siguientes fórmulas (Tabla 5.8):

Tabla 5.8. Modelos de condensación en estrategias con calefacción por suelo radiante. Presencia de condensación si exp(eta)/(1 + exp(eta)) > valor de corte.

COMB	Valor de corte	MODELO DE CONDENSACIÓN: *exp(eta)/(1 + exp(eta))*
A	*0.225*	$eta = -11.974 + 0.371*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}) + 0.0834*HR_{int\ 0.5\ m}$
F	*0.214*	$eta = -25.111 + 0.343*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}) + 0.211*HR_{int\ 0.5\ m} + 0.616*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m})$
G	*0.215*	$eta = -29.893 + 0.320*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}) + 0.230*\ HR_{int\ 0.5\ m} + 0.786*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}) + 0.030*\ HR_{ext}$
I	*0.241*	$eta = -28.650 + 0.383*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}) + 0.242*\ HR_{int\ 0.5\ m} + 0.804*(T_{int\ 3.2\ m} - T_{rocio\ 3.2\ m}) - 0.266*\ (T_{int\ 3.2\ m} - T_{int\ 1.5\ m})$

En la siguiente tabla se resumen los datos del número de días en los que existió o no tanto condensación real como simulada con el modelo, para cada una de las combinaciones:

Tabla 5.9. Número de días en los que existió o no, tanto condensación real como simulada por el modelo en las estrategias con calefacción por suelo radiante.

	Nº DÍAS CONDENSACIÓN		
COMB	**Simulada / Real**	**Si**	**No**
A	**Si**	56	11
	No	4	3
F	**Si**	58	9
	No	2	5
G	**Si**	54	13
	No	3	4
I	**Si**	56	11
	No	2	5

Calculando el día medio para cada combinación y representando la gráfica de condensación real frente a simulada, se obtuvieron los siguientes resultados:

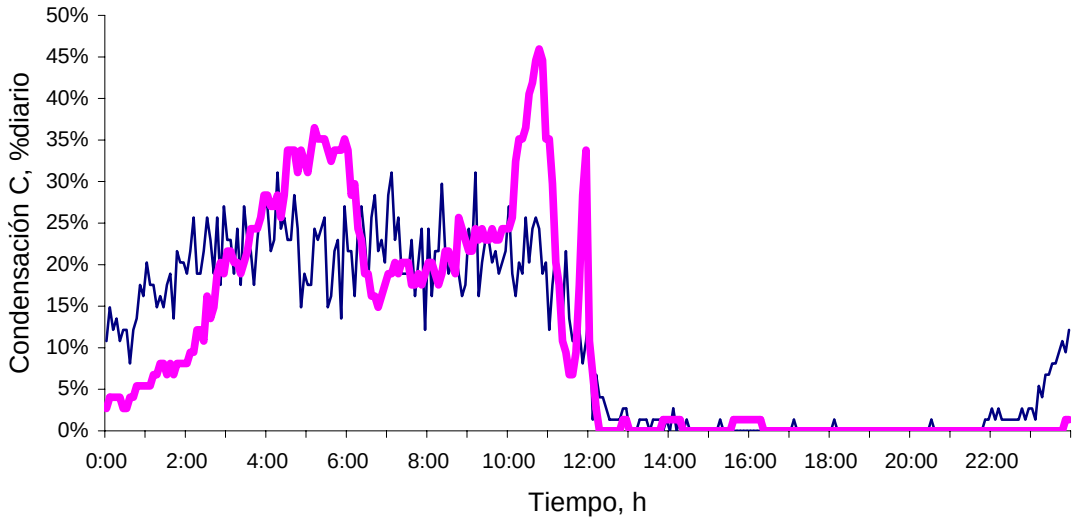


Figura 5.9. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

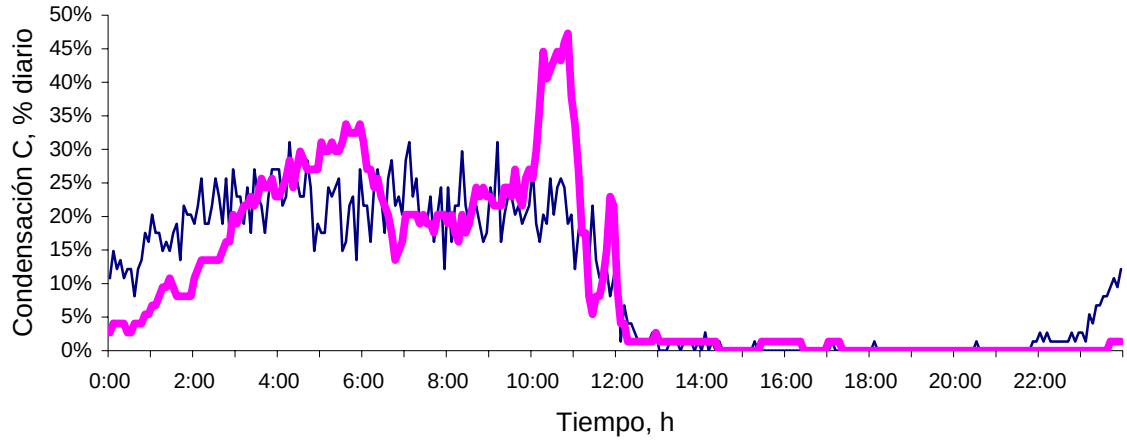


Figura 5.10. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación F en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

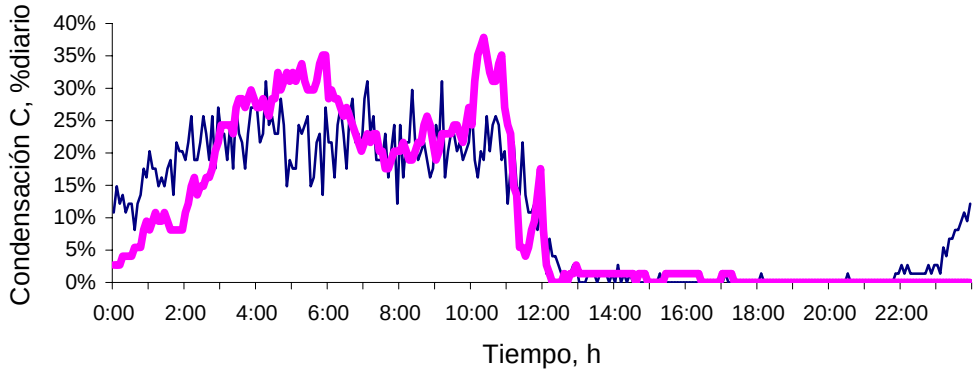


Figura 5.11. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación G en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

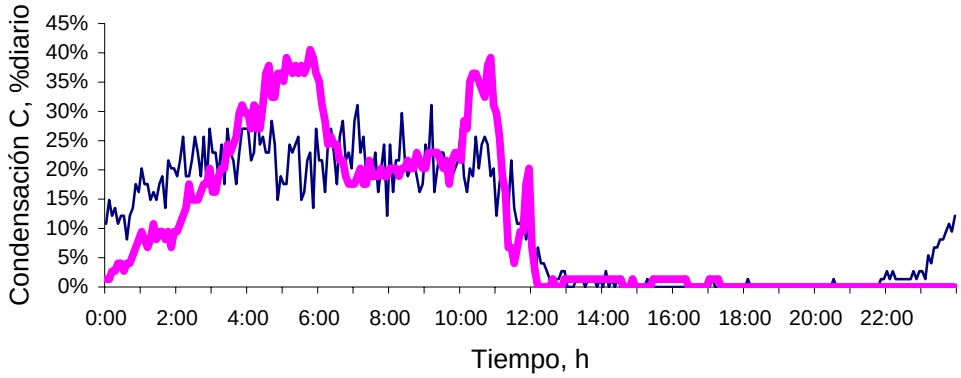


Figura 5.12. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la Combinación I en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

Tal y como se indicó en el Capítulo 4 de Materiales y Métodos, se analizaron seis estrategias distintas que utilizaban calefacción por suelo radiante, combinando la existencia o no de pantalla térmica así como distintos grados de apertura en ventilación nocturna (ver Tabla 4.2, pág. 144).

Una vez analizados los modelos obtenidos con las diferentes combinaciones de parámetros climáticos, se puede decir que el mejor modelo es el correspondiente a la **combinación F** que responde a la fórmula que viene indicada en la Tabla 5.8.

Tabla 5.10. Porcentajes de desviación explicados por los modelos estadísticos obtenidos por regresión logística. Modelos de ajuste en situación del invernadero con calefacción.

Modelo	% Desviación explicado por el modelo
A	**13.9788**
F	**14.9848**
G	15.7707
I	15.5266

Dicha combinación F no es la que presenta el mayor porcentaje de desviación explicado por el modelo (14.9) pero las que quedan por encima de ella (combinación G y combinación I) tienen porcentajes de desviación muy similares, con lo que la combinación F es la elegida por simplicidad del modelo.

No merece la pena aumentar el número de variables independientes si no se produce un aumento significativo del porcentaje de desviación.

Sin embargo, merece la pena detenerse a examinar la combinación A como modelo de ajuste, ya que su porcentaje de desviación explicado por el modelo está muy cerca del de la combinación F y la simplicidad de su modelo es mayor, ya que en la combinación A sólo se tienen dos variables climáticas independientes.

En el caso de que esta combinación A mostrara mejores resultados en la validación del modelo, sería un modelo mejor frente al modelo correspondiente a la combinación F.

Tabla 5.11. Probabilidad de condensación real y simulada por los distintos modelos medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de ajuste en situación del invernadero con calefacción.

Modelo	Condensación	
	Durante todo el día	Periodo 5-9 h
Real	11%	**21.5%**
A	11%	**23.8%**
F	11%	**23%**
G	11%	25%
I	11%	25%

En cuanto a los valores de condensación media para el día medio y en el periodo de 5 a 9 h, para este último periodo la condensación real alcanza un 21.5% mientras que la condensación simulada con la combinación F alcanza un 23%. Para la combinación A el porcentaje de condensación simulada obtenido es del 23.8%. El resto de combinaciones, alcanzan valores de condensación simulada en el periodo de 5 a 9 h cercanos al 25%.

Esta es otra de las razones que justifican la elección de los modelos de predicción correspondientes a las combinaciones A y F para estimar la condensación en periodos en los que se utiliza calefacción por suelo radiante.

La condensación real y simulada por los distintos modelos de ajuste con calefacción asciende a un 11% de condensación media a lo largo de todo el día medio estudiado.

Puede parecer contradictorio que en el ajuste sin calefacción, la condensación real producida en el periodo crítico, de 5 a 9 h alcance un valor del 21% de media del día medio y en el ajuste con calefacción por suelo radiante alcance un valor de condensación media del día medio de 21.5%. Cabe destacar que en el número total de días de los ensayos sin calefacción se incluyen meses con temperaturas superiores (mayo), en los que la condensación disminuye bastante.

Por tanto, no son directamente comparables los valores de condensación en el periodo sin calefacción con los del periodo que utiliza calefacción por suelo radiante, ya que según se ha estudiado en experimentos anteriores, cuando el invernadero dispone de calefacción la condensación producida es menor que cuando el invernadero no dispone

de ningún sistema de calefacción. Esto es exactamente lo que ocurriría si se hubieran realizado ambos ensayos sobre los mismos días del periodo.

Las tablas obtenidas en el análisis de regresión logística para el modelo correspondiente a la combinación A son las siguientes:

Modelo de regresión logística estimado (*Maximun likelihood*): **COMBINACIÓN A**

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Odds Ratio estimado
Constante	-11.9747	0.321226	
$T_{int\ 3.2\ m} - T_{ext}$	0.371994	0.0115281	1.45062
$HR_{int\ 0.5\ m}$	0.0834123	0.00288669	1.08699

Análisis de desviación

Fuente	Desviación	Df	P-Value
Modelo	2075.73	2	0.0000
Residual	12773.4	22034	1.0000
Total (Corr.)	14849.2	22036	

Porcentaje de desviación explicado mediante el modelo = **13.9788**

A continuación se estudia la condensación real y la condensación simulada con el modelo correspondiente a la combinación A, producida a lo largo de un día medio para cada una de las 6 estrategias de calefacción por suelo radiante ensayadas (Tabla 4.2).

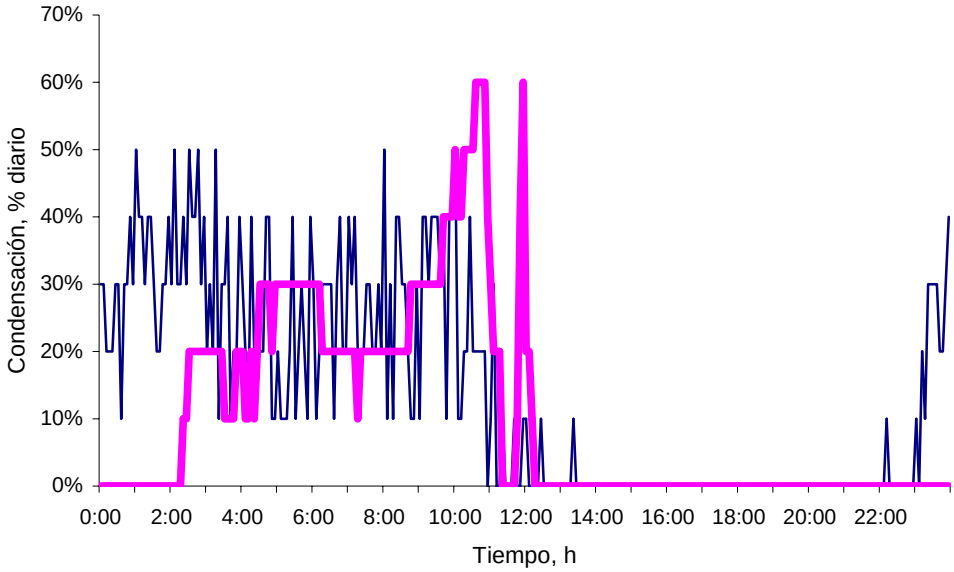


Figura 5.13. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Sin ventilación nocturna.*

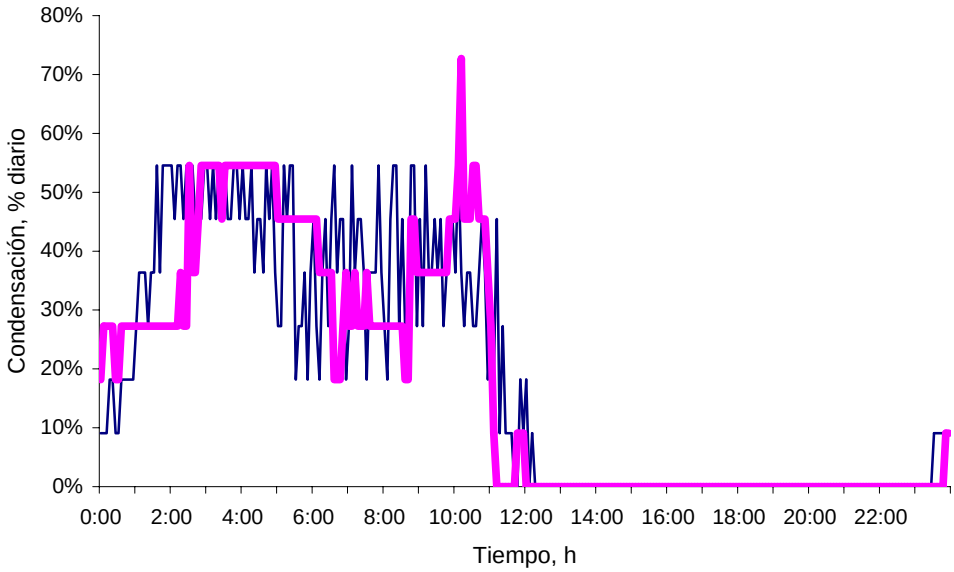


Figura 5.14. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (8 cm).*

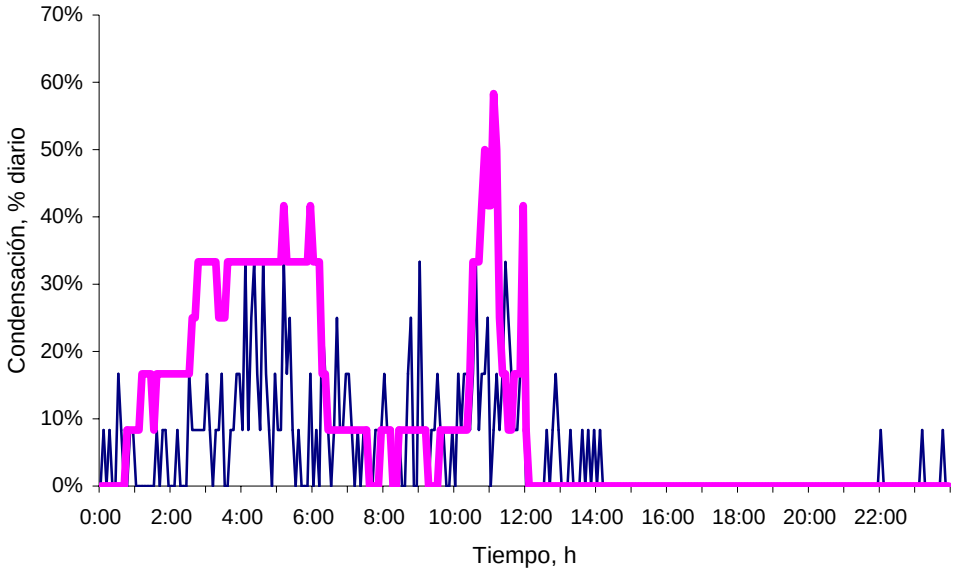


Figura 5.15. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. No se usa pantalla térmica. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (25 cm).*

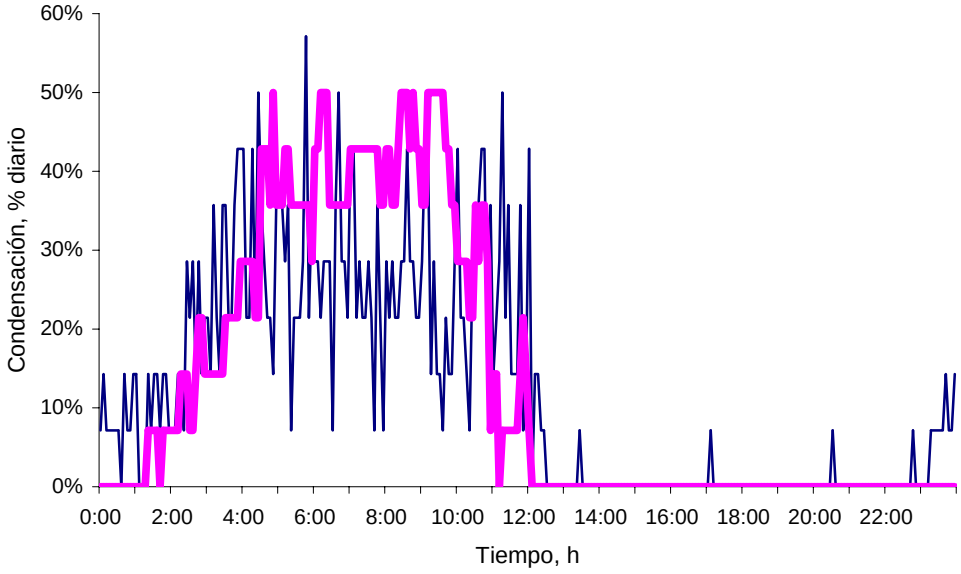


Figura 5.16. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna, sin ventilación nocturna.*

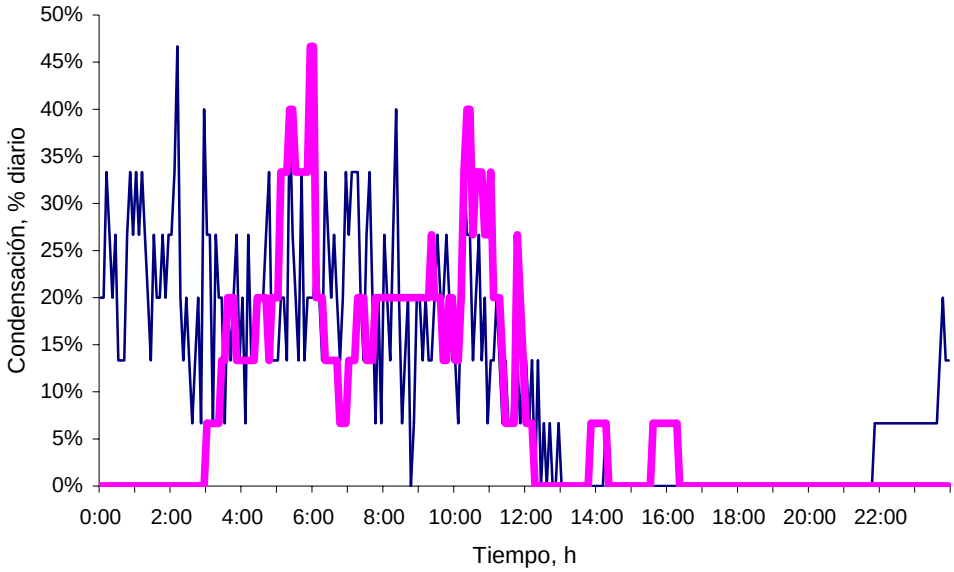


Figura 5.17. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital (apertura 100%) diurna. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (8 cm).*

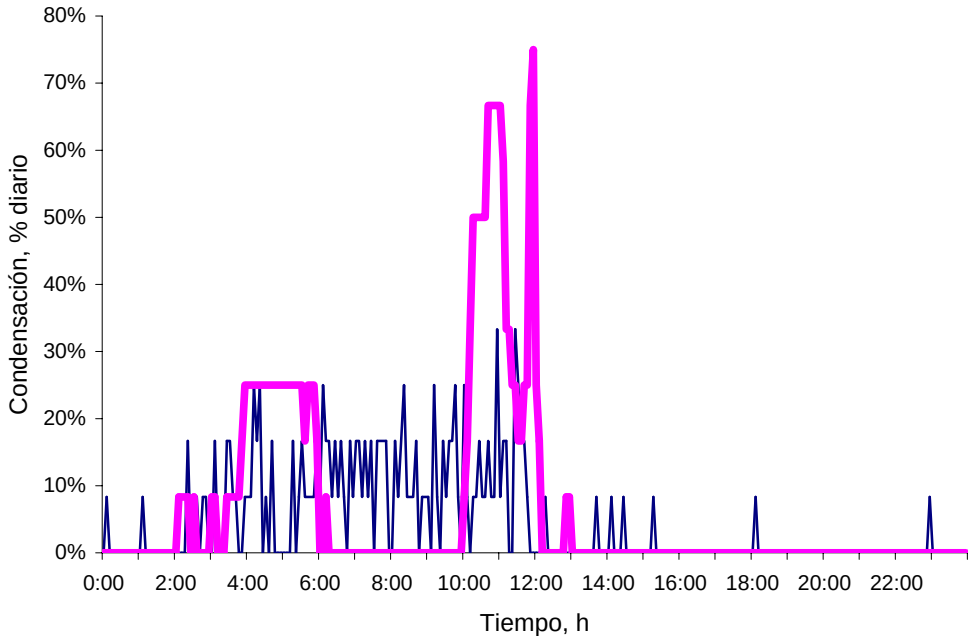


Figura 5.18. *Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, pantalla térmica y ventilación cenital y lateral (apertura 100%) diurna. Ventilación cenital nocturna de 5 a 9 h (25 cm).*

Como puede observarse en las gráficas anteriores, la condensación producida en el interior del invernadero tanto real como simulada con el modelo A, es menor en las estrategias con calefacción por medio de suelo radiante, con ventilación cenital (100%) diurna y ventilación cenital nocturna con apertura de 25 cm.

La única diferencia entre ellas es que en la estrategia 3 no se utilizó pantalla térmica mientras que en la estrategia 6 la pantalla térmica estaba extendida.

Cuando el invernadero utiliza calefacción por suelo radiante, ventilación cenital diurna (100%) y ventilación cenital nocturna con apertura de ventana igual a 8 cm, la condensación media tanto real como simulada con el modelo es mayor que con apertura cenital nocturna de 25 cm.

Tabla 5.12. Probabilidad de condensación real y simulada por el modelo de la combinación A (estudiada para cada estrategia de la Tabla 4.2) medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Situación del invernadero con calefacción.

MODELO A CON CALEFACCIÓN	Todo el día		Periodo 5-9h	
	Real	Simulada	Real	Simulada
Estrategia 1	13.8%	10.4%	24.1%	23.7%
Estrategia 2	18.7%	17.9%	37.6%	34.1%
Estrategia 3	5%	9.3%	9%	15.6%
Estrategia 4	12.2%	13%	27.3%	40.5%
Estrategia 5	11%	7.9%	21%	21.8%
Estrategia 6	4.3%	6.4%	10.7%	6%

Si se compara con el primer grupo de experimentos (Tabla 5.1), coincide que la estrategia sin pantalla, con suelo radiante, con ventilación cenital diurna (100%) y ventilación cenital nocturna de apertura 25 cm (estrategia 3) es la que presenta menos condensación de todas las estrategias sin pantalla, en torno a un 5% de condensación media diaria (*Fig. 5.15* y Tabla 5.12*)*. Pero si se analiza la estrategia con suelo radiante, ventilación cenital diurna (100%), ventilación cenital nocturna de apertura 25 cm y presencia de pantalla térmica (estrategia 6), la condensación media diaria todavía es menor, de un 4.3% (*Fig. 5.18* y Tabla 5.12).

Tabla 5.13. Número de días en los que existió o no, tanto condensación real como simulada por el modelo de la combinación A para cada una de las estrategias con calefacción por suelo radiante (Tabla 4.2).

	Nº DÍAS CONDENSACIÓN		
ESTRATEGIA CALEFACCIÓN	**Simulada / Real**	**Si**	**No**
1	**Si**	9	1
	No	0	0
2	**Si**	9	1
	No	0	1
3	**Si**	9	3
	No	0	0
4	**Si**	10	3
	No	0	0
5	**Si**	8	2
	No	4	2
6	**Si**	11	1
	No	0	0

Esto se debe, como puede verse en la Figura 5.19, a que en la estrategia que utiliza pantalla térmica, la temperatura del invernadero durante la noche es mayor que cuando no existe pantalla y por tanto el aire del invernadero admite mayor cantidad de vapor de agua hasta la saturación, es decir, absorbe más humedad, lo que debería de reducir los problemas de condensación.

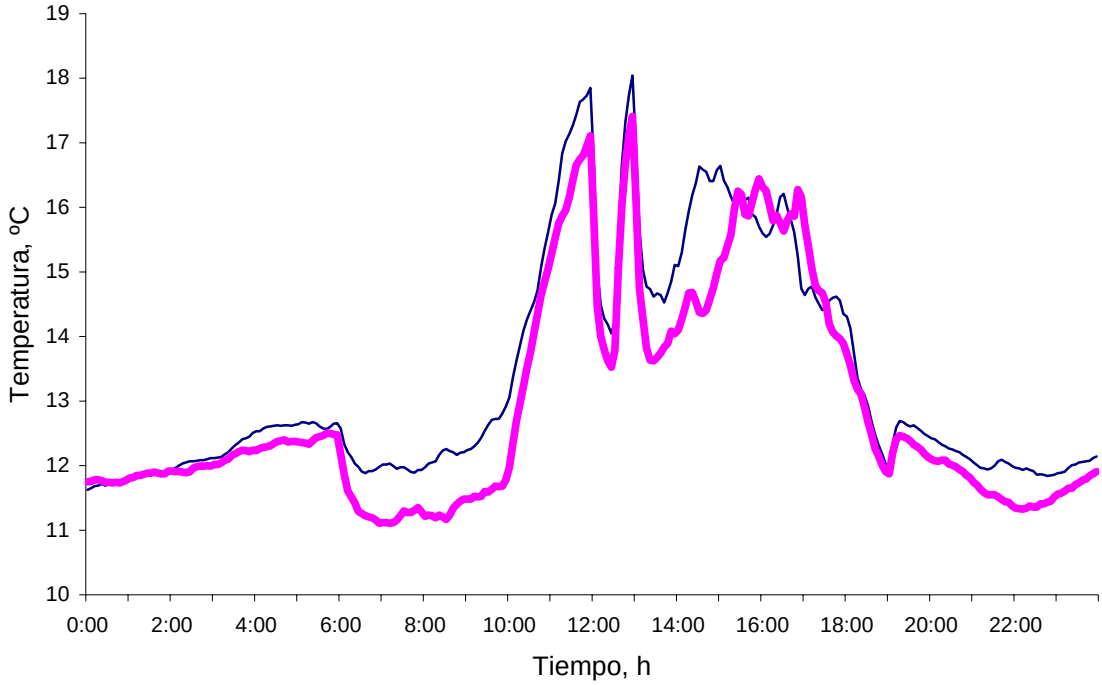


Figura 5.19. *Gráfica comparativa de la temperatura del invernadero, ºC, a lo largo del día medio, para la estrategia 6 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y pantalla térmica (_____) y la estrategia 3 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y sin pantalla térmica (_____), medida a 1.5 m de altura.*

En la Figura 5.20, se observa esta comparativa para la temperatura interior del invernadero medida a 3.2 m de altura, a lo largo de un día medio. Según indica la gráfica, la temperatura a 3.2 m de altura medida durante la noche es menor en la estrategia que tiene extendida la pantalla térmica (estrategia 6), ya que ésta impide que el aire caliente suba por encima de ella.

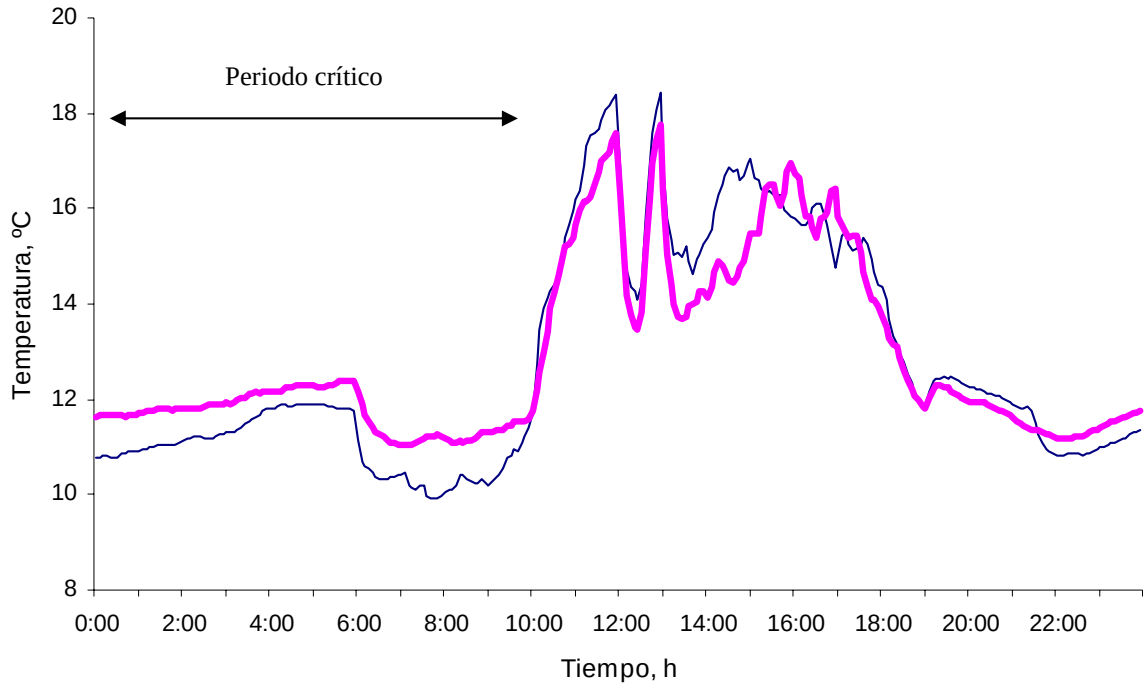


Figura 5.20. *Gráfica comparativa de la temperatura del invernadero, ºC, a lo largo del día medio, para la estrategia 6 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y pantalla térmica (_____) y la estrategia 3 que combina suelo radiante con apertura de la ventana cenital de 25 cm nocturna y sin pantalla térmica (_____), medida a 3.2 m de altura.*

La influencia de la presencia de pantalla térmica sobre la condensación se puede observar también en las estrategias con ventilación cenital nocturna y apertura de 8 cm (estrategias 2 y 5). En la estrategia 2 que no utiliza pantalla térmica, se produce un porcentaje de condensación media diaria del 37,6% en el periodo crítico de 5 a 9 h (*Fig. 5.14* y Tabla 5.12*)*, mientras que en la estrategia 5 (*Fig. 5.17* y Tabla 5.12*)* que utiliza pantalla térmica, el porcentaje de condensación media diaria es del 21% (medido también de 5 a 9 h).

Si se mide la probabilidad de condensación media para todo el día medio estudiado, las estrategias con apertura cenital nocturna de 8 cm presentan mayores valores de condensación real que las estrategias con apertura cenital nocturna de 25 cm.

Las estrategias 2 y 5 presentan condensaciones reales medias diarias de 18.7% y 11% respectivamente, mientras que las estrategias 3 y 6 alcanzan valores de condensación real media en torno al 5%.

Puede parecer, según la Tabla 5.13, que en las estrategias 2 y 5, con 8 cm de apertura cenital nocturna, hay un menor número de días en los que se produce condensación real, pero sin embargo, en los días en los que se produce condensación la probabilidad de condensación media diaria es muy superior a la de las estrategias 3 y 6, con 25 cm de apertura cenital nocturna.

5.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

5.3.1. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS SIN CALEFACCIÓN

Los dos modelos que se van a validar, según los resultados obtenidos en el ajuste, son los correspondientes a las combinaciones C y H. Se representó para cada una de las combinaciones, la gráfica de la condensación real y condensación simulada con el modelo para el día medio del periodo considerado y que en el caso de la validación sin calefacción comprendía datos desde septiembre a diciembre de 2003.

Aplicando el modelo obtenido en ajuste para la combinación C, que responde a la fórmula indicada en la Tabla 5.3 se obtiene la gráfica del día medio tanto para condensación real como para condensación simulada por el modelo (*Fig. 5.21*):

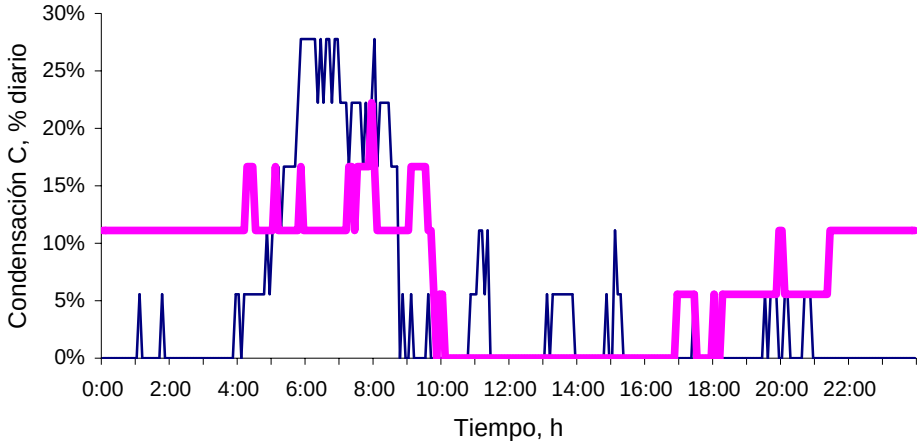


Figura 5.21. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación C en situación del invernadero sin calefacción.*

Tabla 5.14. Probabilidad de condensación real y simulada por los modelos correspondientes a las combinaciones C y H medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de validación en situación del invernadero sin calefacción.

Valor corte	Modelo	Condensación	
		Durante todo el día	Periodo 5-9 h
-	**Real**	4%	20%
0.345	**C**	5%	14%
0.639	**H**	4%	13%

Como puede verse en la *Fig. 5.21*, la combinación C obtenida en el ajuste del modelo para la situación del invernadero que no utiliza ningún sistema de calefacción produce unos resultados aceptables.

Para el día medio del periodo estudiado, la condensación promedio tanto para la condensación real como para la condensación simulada alcanzó valores en torno al 4%.

Si se estudia el promedio para el periodo crítico, de 5 a 9 h, se obtienen valores del 14% para la condensación simulada y del 20% para la condensación real, con temperaturas en el interior del invernadero en torno a 13.5ºC y humedad relativa en torno al 69%.

Aplicando el modelo obtenido en ajuste para la combinación H, que responde a la fórmula indicada en la Tabla 5.3 se obtiene la gráfica del día medio tanto para condensación real como para condensación simulada por el modelo (*Fig. 5.22*):

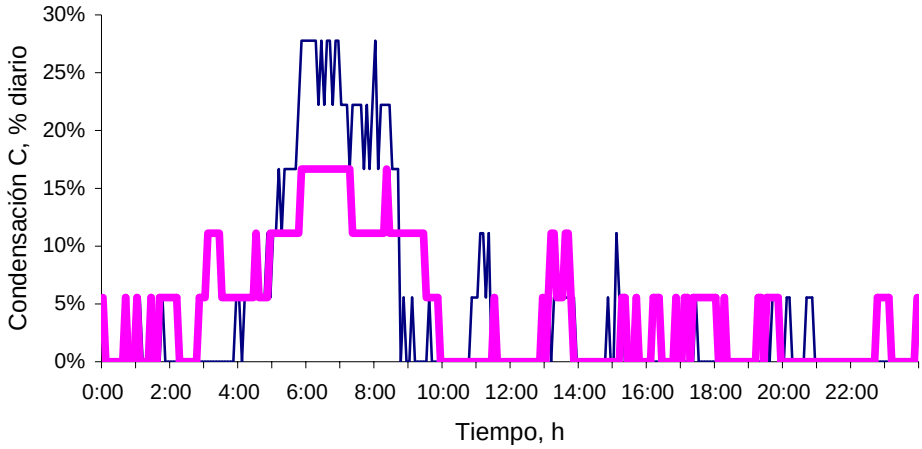


Figura 5.22. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación H en situación del invernadero sin calefacción.*

Para el día medio del periodo estudiado, la condensación promedio tanto para la condensación real como para la condensación simulada fue del 4%.

Si se estudia el promedio para el periodo crítico, de 5 a 9 h, se obtienen valores del 13% para la condensación simulada y del 20% para la condensación real, con temperaturas en el interior del invernadero en torno a 13.5ºC y HR_{int} del 69%.

Analizando la validación de ambas combinaciones, se elige la combinación C frente a la combinación H ya que, aunque en la validación no hay una diferencia significativa entre los valores de las condensaciones medias simuladas en el periodo de 5 a 9 h (13% para la combinación H y 14% para la combinación C), y además según el criterio utilizado en el ajuste, la combinación H era la que presentaba un valor de condensación media (19%) más cercano al de la condensación real (21%) producida durante el periodo de ajuste estudiado, desde marzo a mayo de 2003 (Tabla 5.6), la ecuación del modelo correspondiente a la combinación C estaba más acorde con el proceso físico real de la condensación y con la influencia de las variables climáticas implicadas.

Otra razón para elegir el modelo de regresión logística correspondiente a la combinación C es que incluye un menor número de variables climáticas y por tanto es un modelo más sencillo para su implementación en campo.

Finalmente, para predecir la condensación producida en el interior de un invernadero que no utiliza ningún sistema de calefacción las variables climáticas a medir son:

- Humedad relativa interior medida a 0.5 m de altura.
- Temperatura de rocío a 3.2 m de altura calculada como función de la humedad relativa interior a 0.5 m de altura y la temperatura interior del invernadero a 3.2 m de altura.

5.3.2. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELO PARA ESTRATEGIAS CON CALEFACCIÓN POR SUELO RADIANTE

A continuación se muestran las gráficas que representan los valores de condensación real y simulada con cada uno de los modelos obtenidos a lo largo del día medio del periodo correspondiente a validación con calefacción.

A continuación se muestran las gráficas para los cuatro modelos, aunque según se observa en las *Figs. 5.25 y 5.26*, los modelos correspondientes a las combinaciones G e I eran los peores en ajuste y tampoco se ajustan bien a los datos de validación.

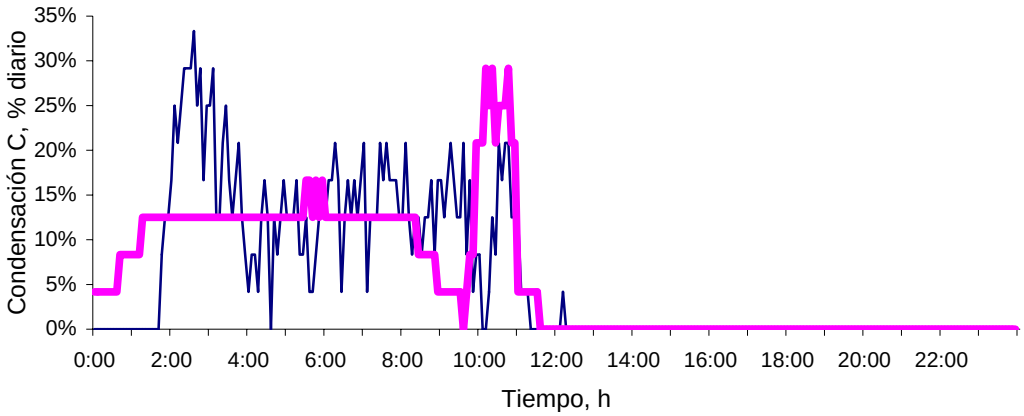


Figura 5.23. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación A en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

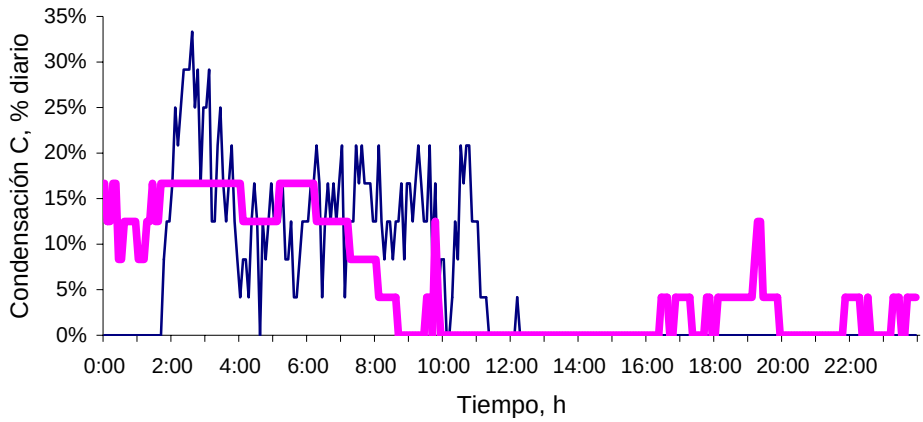


Figura 5.24. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación F en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

Los modelos correspondientes a las combinaciones A y F son los que presentan mejor respuesta en el periodo de validación.

Tabla 5.15. Probabilidad de condensación real y simulada por los modelos correspondientes a la combinaciones A y F medida a lo largo de todo el día y en el periodo crítico de 5-9 h. Modelos de validación en situación del invernadero con calefacción.

Valor corte	Modelo	Condensación	
		Durante todo el día	Periodo 5-9 h
-	**Real**	5.6%	13.3%
0.690	**A**	5.6%	12%
0.994	**F**	5.6%	10.3%

En la Tabla 5.15 se comparan las dos combinaciones que resultaron mejores en el ajuste del modelo en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante, por un lado la combinación F que es la que mejor resultó en ajuste y por otro lado la combinación A.

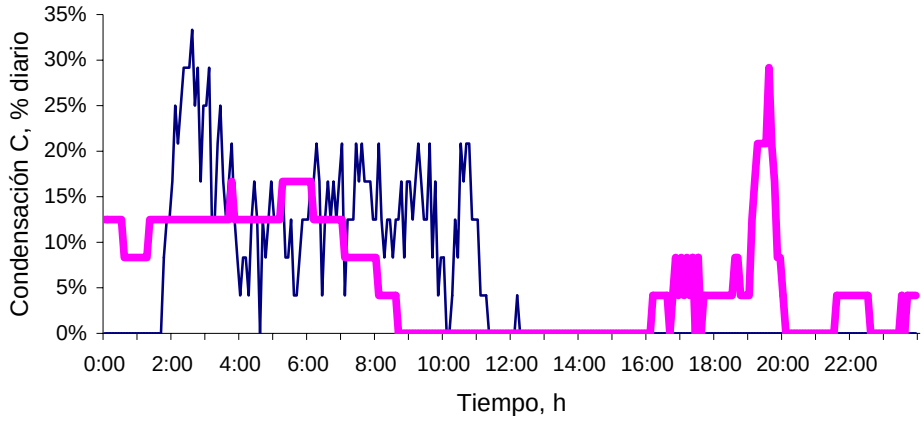


Figura 5.25. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación G en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

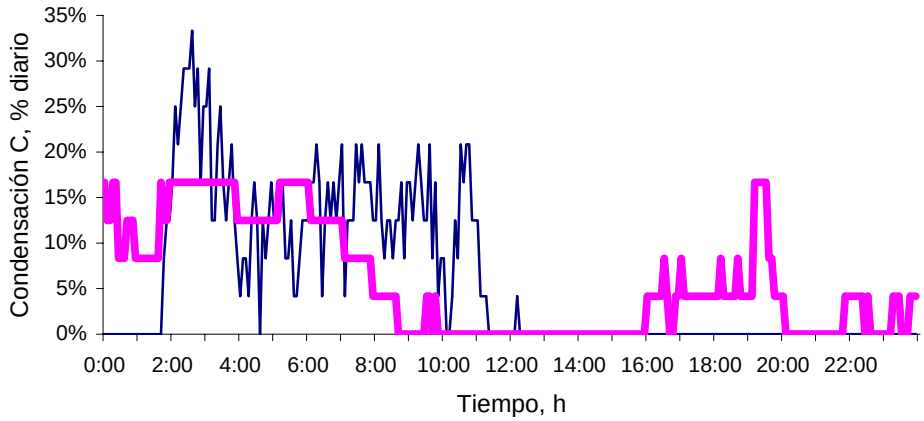


Figura 5.26. *Validación del modelo: Gráfica comparativa de la condensación real (_____) y simulada por el modelo (_____) (% del tiempo) producida a lo largo de un día medio para la combinación I en situación del invernadero con calefacción por suelo radiante.*

Según puede observarse en la *Fig.5.23*, el modelo obtenido en el ajuste reproduce la realidad. El porcentaje de condensación media real del día medio para el periodo crítico de 5 a 9 h es del 13% y el porcentaje obtenido con el modelo de la combinación A para el mismo periodo es de un 12%.

Centrando el estudio en la condensación producida a lo largo de todo el día, en el periodo con calefacción se obtiene una media de la probabilidad de condensación diaria del 5.6% tanto para la condensación real producida como para la simulada por el modelo.

Si se analiza la combinación F obtenida en ajuste aplicada ahora sobre los datos de validación, se obtiene una probabilidad de condensación media de 10.3% en el periodo crítico (de 5 a 9 h).

Por tanto, para la predicción de la condensación en periodos en los que se aplica calefacción por suelo radiante, el mejor modelo de regresión logística sería el correspondiente la combinación A.

Además, es importante resaltar que el modelo de predicción obtenido tiene gran valor ya que el periodo de validación con calefacción es un periodo en el que se aplicaron distintas técnicas de control climático del invernadero que combinaban calefacción por medio de suelo radiante con diferentes grados de apertura de la ventana cenital nocturna.

Por tanto, para predecir la condensación producida en el interior de un invernadero que utiliza un sistema de calefacción por suelo radiante, las variables climáticas a medir se resumen en:

- Humedad relativa interior medida a 0.5 m de altura.
- Salto térmico entre temperatura interior medida a 3.2 m y la temperatura exterior.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

6.1. ESTUDIOS COMPARATIVOS ENTRE ESTRATEGIAS DE CALEFACCIÓN CON SUELO RADIANTE Y ESTRATEGIAS CON AEROTERMOS

- La humedad relativa del invernadero, a una altura de 0.5 m, presenta unos valores significativamente inferiores con calefacción por aire caliente respecto a la calefacción por suelo radiante (con reducciones entre el 27 y el 34%) en horario nocturno, de 5:00 a 9:00 h.
- La presencia de condensación en el techo presenta también unos valores inferiores con calefacción por aire caliente (condensación 13% del tiempo) respecto a la calefacción por suelo radiante (condensación 30% del tiempo) siempre en horario nocturno, de 5:00 a 9:00 h, aunque esta diferencia no es significativa estadísticamente.
- En el mismo período nocturno, y con suelo radiante, la condensación se reduce significativamente con ventilación cenital (apertura reducida, 25 cm) pasando del 30% del tiempo al 8%. Con este sistema de calefacción, se demuestra que una apertura de la ventilación cenital de 8 cm no es efectiva para reducir la condensación. Con calefacción por aire caliente, la ventilación cenital (apertura reducida, 25 cm) también reduce el tiempo con condensación de valores del 13% a valores prácticamente nulos.

6.2. ENSAYOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CONDENSACIÓN EN INVERNADEROS

- El mejor modelo de ajuste sin calefacción tiene en cuenta la humedad relativa interior medida a 0.5 m de altura y la temperatura de rocío calculada a 3.2 m de altura como función de la humedad relativa interior a 0.5 m y la temperatura interior del invernadero medida a 3.2 m.
- El mejor modelo de ajuste con calefacción por suelo radiante sólo tiene en cuenta la humedad relativa interior medida a 0.5 m de altura y la diferencia de temperaturas entre la interior a 3.2 m y la exterior.
- Las estrategias de calefacción que utilizan pantalla térmica presentan menores valores de condensación media diaria. La pantalla térmica retiene el calor y el aire del invernadero alcanza una temperatura superior, disminuyendo la humedad relativa y por tanto las posibilidades de condensación.
- El modelo obtenido predice bien los cambios de manejo que se producen en las distintas situaciones del invernadero (ventilación, calefacción, pantalla térmica, etc).
- Los modelos obtenidos como mejores en el ajuste, producen muy buenos resultados en la predicción de la condensación tanto en situaciones del invernadero sin calefacción como en situaciones con calefacción por medio de suelo radiante, resaltando la robustez de dichos modelos al estar validándose sobre un conjunto de datos heterogéneo que aplicaba diferentes técnicas de control climático. Este tipo de ajuste podría utilizarse para un control del invernadero de fácil implementación en campo.

7. PROPUESTAS DE TRABAJOS POSTERIORES

7. PROPUESTAS DE TRABAJOS POSTERIORES

Los trabajos que se pueden realizar para ampliar los estudios desarrollados en la presente tesis son los siguientes:

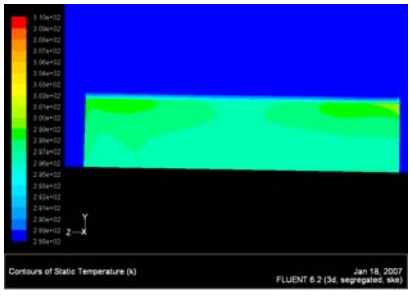
- Establecer modelos climáticos que permitan simular la variación de la humedad absoluta y relativa en el interior de invernaderos.

- Establecer modelos que incluyan el balance de vapor de agua en el interior del invernadero y su relación con la presencia de condensación. Utilizar sensores que proporcionen unos valores de la variable de condensación continuos (cantidad de agua condensada) y no sólo valores discretos de 0 ó 1.

- Realizar medidas de la condensación en una distribución espacial y su relación con las variaciones de la humedad relativa.

- Medir la transpiración de las plantas, para determinar si la transpiración aumenta al mejorar las condiciones de ventilación a primera hora de la mañana. Relacionar la transpiración con la necesidad de humedad atmosférica (déficit de presión de vapor, DPV) en vez de con los valores de humedad relativa.

- Obtener mediante modelos CFD la distribución espacial de temperaturas, de humedades relativas y de presencia de condensación en el interior del invernadero, para determinar las regiones con mayor riesgo de condensación.



Distribución de temperaturas en el plano medio longitudinal del invernadero obtenido mediante el código CFD ***Fluent***.

8. BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ J.; SOBRÓN F. Y BOLADO S. (1996). Solution for heat floor in soil with a heat source at a fixed depth. *Soil Science Society of America Journal* 60 (4): 1028-1035.

ÁLVAREZ A.J.; VALERA D.L. Y MOLINA F.D. (2005). Efectos de las mallas anti-insectos sobre la ventilación en invernaderos. *Vida Rural* 219: 44-48.

BAILEY B.J. (1991). Climate modelling and control in greenhouses. In: Progress in Agricultural and Engineering. Editorial John Matthews Cab Interational.

BAILEY B.J. Y CHALABI Z.S. (1994). Improving the cost effectiveness of greenhouse climate control. *Computers and Electronics in Agric.* 10 (3): 203-214.

BAILEY B.J. (1999). The use of models in greenhouse environmental control. *Acta Horticulturae* 491: 93-99.

BAILLE A. (1999). Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. *Acta Horticulturae* 491: 37-47.

BAKER J.C. (1991) Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables. *PhD Thesis, Agriculture University, Wageningen, The Netherlands.*

BAPTISTA F.J.; BAILEY B.J. Y MENESES J.F. (2001). Natural ventilation of greenhouses: comparison of measured and predicted ventilation rates. *Agribuilding* 3-6, September 2001. Campinas, S.P. Brasil.

BARTZANAS T.; TCHAMITCHIAN M. Y KITTAS C. (2005). Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy cosumption. *Biosystems Engineering* 91 (4): 487-499.

BASÇETINÇELIK A. Y HÜSEYIN H. (1997). The determination of the overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouses with thermal screens. *Acta Horticulturae* 443: 85-91.

BENAVENTE R.M.; GARCÍA J.L.; PASTOR M.; LUNA L. Y NOLASCO J. (2000a). Sistemas para la automatización de los invernaderos. *Vida Rural* 118: 66-70.

BENAVENTE R.M.; GARCÍA J.L.; NAVAS L.M.; ELENA F. Y PASTOR M. (2000b). Automatismos de control de clima en invernaderos. *Horticultura* 149: 28-41.

BENAVENTE R.M.; GARCÍA J.L; LUNA L.; ROMERO A. Y DOMÍNGUEZ V.M. (2001c). Instalaciones eléctricas en invernaderos. *Energía.* Agosto 2001: 143.146.

BOAVENTURA CUNHA J. Y DE MOURA OLIVEIRA J.P. (2003). Optimal Management of Greenhouse Environments. *EFITA 2003 Conference 5-9 July 2003*: 559-564. Debrecen. Hungary.

BOAVENTURA CUNHA J. (2003). Greenhouse climate models: An overview. *EFITA 2003 Conference 5-9 July 2003;* Debrecen. Hungary.

BOTH A.J. (2000). Basics Principals of Winter Ventilation. *Horticultural Engineering* 15 (5) september 2000.

BOULARD T.; DRAOUI B. Y NEIRAC F. (1995). Calibration and validation of a greenhouse climate control model. *ISHS Acta Horticulturae.* 406.

BOULARD T.; DRAOUI B. (1995). Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis, *Journal of Agricultural Engineering Research*. 61: 27-36.

BOULARD T. Y BAILLE A. (1995). Modelling of air exchange in a greenhouse fitted with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 37-48.

BOULARD T. Y WANG S. (2000). Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 25-34.

BOULARD T.; WANG S. Y HAXAIRE R. (2000). Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in an empty greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 169-181.

BOULARD T. Y WANG S. (2002). Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 173-190.

BOULARD T.; KITTAS C.; ROY J.C. Y WANG S. (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 2: Determination of the distributed greenhouse climate. *Biosystems Engineering* 83 (2): 129-147.

BOULARD T.; FATNASSI H.; ROY J.C.; LAGIER J.; FARGUES J.; SMITS N.; ROUGIER M. Y JEANNEQUIN B. (2004). Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer. *Agricultural and Forest Meteorology* 125: 225-239.

BRISCOE A. Y CHITTKA L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, 46:471-510.

CABELLO T.; VAN DER BLOM J. Y SOLER A. (2005). Efectos de los plásticos antiplagas sobre los insectos polinizadores en invernadero. *Vida Rural* 219: 40-42.

CAMPBELL G.S.; JUNGBAUER J.D.; BIDLAKE W.R. Y HUNGERFORD R.D. (1994). Predicting the effect of temperature on soil thermal-conductivity. *Soil Science* 158 (5): 307-313.

CAMPEN J.B. Y BOT G.P.A. (2002). Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosystems Engineering* 82 (2): 177-185.

CASTILLA N. (1994). Greenhouses in the Mediterranean areas: Technological level and strategic management. *Acta Horticulturae* 361: 44-56.

CASTILLA PRADOS N. (2007). *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo.* (Ed.) Mundi-Prensa, 2ª ed.

CERVANTES M.A. (2002a). Ventilación en cultivos intensivos. Artículo obtenido de la página web www.infoagro.com.

CERVANTES M.A. (2002b). Control de las altas temperaturas en cultivos hortícolas intensivos. Artículo obtenido de la página web www.infoagro.com.

CRITTEN D.L. Y BAILEY B.J. (2002). A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology* 112: 1-22.

DAY W. Y BAILEY B.J. (1999). Physical principles of microclimate modification. In *Greenhouse ecosystems.* Stanhill G.; Enoch H.Z. (Ed.) Elsevier. Amsterdam. Netherlands: 71-96.

DE LA PLAZA S.; BENAVENTE R.M.; GARCÍA J.L.; NAVAS L.; LUNA L.; DURÁN J. Y RETAMAL N. (1999). Modelling an optimal design of fan electric substrate heating system for greenhouse crops. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73 (2): 131-139.

DEMRATI H.; BOULARD T.; BEKKAOUI A. Y BOUIRDEN L. (2001). Natural ventilation and microclimatic performance of a large-scale banana greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80 (3): 261-271.

ENOCH H.Z. (1986). Climate and protected cultivation. *Acta Horticulturae* 176: 11-20.

ENOCH H.Z. Y ENOCH Y. (1999). The history and geography of the greenhouse. *Greenhouse Ecosystems.* Stanhill G., Enoch H.Z. (Ed.) Elsevier. Amsterdam: 1-15.

FATNASSI H.; BOULARD T.; BOUIRDEN L. Y SAPPE G. (2001b). Ventilation performance of a large canarian type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Acta Horticulturae.*

FATNASSI H.; BOULARD T.; DEMRATI H.; BOUIRDEN L. Y SAPPE G. (2002). Ventilation performance of a large canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Biosystems Engineering* 82 (1): 97-105.

FATNASSI H.; BOULARD T. Y LAGIER J. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. *Biosystems engineering* 88 (4): 467-478.

FERENTINOS K.P.; ALBRIGHT D. Y RAMANI D.V. (2000). Optimal Light integral and CO_2 concentration combination for lettuce in ventilation greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77 (3): 309-315.

FERNÁNDEZ M.D; RODRÍGUEZM.R.; MASEDA F.; VELO R. Y GONZÁLEZ M.A. (2005). Modelling the transient thermal behaviour of sand substrate heated by electric cables. *Biosystems Engineering* 90 (2): 203-215.

GARCÍA J.L.; NAVAS L.M.; BENAVENTE R.M.; LUNA L. Y MUÑOZ M. (1999). Diferentes tipos de invernaderos. *Vida Rural* 88: 44-47.

GARY C. (1999). Modelling greenhouse crops: State of the art and perspectives. *Acta Horticulturae* 495: 317-321.

HAND D.W. (1998) Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 229: 143-155.

HERNÁNDEZ J. Y CASTILLA N. (2000). Los invernaderos mediterráneos en España: III. Paquetes tecnológicos disponibles. *Horticultura* 142: 37-39.

HOLDER R., COCKSHULL K.E. (1990) Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Agricultural Science* 65: 31-39.

HUERTAS L. (2008). El control ambiental en invernaderos: humedad relativa. *Horticultura* 205: 52-54.

ITO T. (1999). The greenhouse and hydroponic industries in Japan. *Acta Horticulturae* 481: 761-764.

JAFFRIN A.; BENTOUNES N.; JOAN A.M. Y MAKHLOUF S. (2003). Landfill Biogas for Heating Greenhouses and Providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth. *Biosystems Engineering* 86 (1): 113-123.

JOLLIET O. (1999). The water cycle. En: *Greenhouse Ecosystems.* Stanhill G.; Enoch H.Z. (Eds). Elsevier. Amsterdam: 303-326.

KATSOULAS N.; BAILLE A. Y KITTAS C. (2001). Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. Agricultural and Forest Meteorology 106: 233-247.

KEMPES F.L.K. Y VAN DER BRAAK N.J. (2000). Heating system position and vertical microclimate distribution in chrysanthemum greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 104: 133-142.

KITTAS C.; BOULARD T. Y PAPADAKIS G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE* 40 (2): 415-425.

KURPASKA S. Y SLIPEK Z. (2000). Optimization of greenhouse substrate heating. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76 (2): 129-139.

LA MALFA G. Y LEONARDI C. (2001). Los invernaderos mediterráneos en España: III. Paquetes tecnológicos disponibles. *Horticultura* 142: 37-39.

LEE I. Y SHORT T.H. (2000). Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions of the ASAE* 43 (3): 745-753.

LINKER R. Y SEGINER I. (2003). Water Stress Detection in a Greenhouse by a Step Change of Ventilation. *Biosystems Engineering* 84 (1): 79-89.

LUO Y.; LOOMIS R.T. Y HSIAU (1992). Simulation of soil temperature in crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 61 (1-2): 23-38.

MARTIJN H.; VAN LOON W.K.P.; VEN DER VALLE T.: SPEETJENS S.L. Y BOT P.A. (2006). A computacional Fluid Dynamics Model for Designing Heat Exchangers based on Natural Convection. *Biosystems Engineering* 94 (3): 443-452.

MARTIN-CLOUAIRE R.; SCHOTMAN P.J. Y TCHMITCHIAN M. (1996). A survey of computer based approaches for greenhouse climate management. *Acta Horticulturae* 406: 409-423.

MARTÍNEZ CARRASCO F. (2001). El sistema de comercialización de la horticultura intensiva almeriense: Un análisis del comportamiento de precios y márgenes. Tesis doctoral. Universidad de Almería. Almería.

MEDRANO E. (1999). Gestión del riego en cultivo de pepino *Cucumis sativus* L. en sustrato: Evaluación de la transpiración durante la ontogenia. *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.*

MELIÁN NAVARRO M.A.; RUIZ CANALES A. Y ABADÍA SÁNCHEZ R. (2008). La horticultura de invernadero en España. *Horticultura Internacional* 61:12-20.

MÍNGUEZ P.L. (1998). Los determinantes microclimáticos de la horticultura en el Sur Mediterráneo. Curso Superior de Especialización de Invernaderos II. Editores: Pérez J. y Cuadrado I.M. Consejería de Agricultura, Junta de Andalucía, España.

MISTRIOTIS A. Y BRIASSOULIS D. (2002). Numerical estimation of the internal and external aerodynamic coefficients of a tunnel greenhouse structure with openings. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 191-205.

NARA M. (1979). Studies on air distribution in farm buildings-two dimensional numerical and experiment. *Journal of the Society of Agricultural Structures* 9 (2): 18-25.

NELSON P.V. (1998). Greenhouse Operation and Management (fifth edition). Prentice Hall, Uppler Saddle River, New Jersey. USA.

NIELSEN O. (2002). Natural Ventilation of a Greenhouse With Top Screen. *Biosystems Engineering* 81 (4): 443-451

NISEN A.; GRAFIADELLIS M.; JIMÉNEZ R.; LA MALFA G.; MARTÍNEZ-GARCÍA P.F.; MONTEIRO A.; VERLODT H.; VILLELE O.; ZABELTITZ C.H.; DENIS J.C.; BUDOIN W. Y GARNAUD J.C. (1988). Cultures protégées en climat méditerranéen. *FAO.* Roma.

OLIVEIRA C.E.L.; GARCÍA J.L.; BENAVENTE R.M.; SIRVIENTE B. Y MUÑOZ M. (1999). Calefacción de invernaderos. *Vida Rural* 11: 44-45.

OTTOSEN C.O.; ROSENQVIST E. Y AASLYBG J.M. (2004). Un nuevo concepto de control climático. *Revista Horticultura* 181 (Diciembre 2004): 14-18.

PEEYUSH S.; SALOKHE V.M. Y TANTAU H.J. (2005). Effect of Screen Mesh Size on Vertical Temperature Distribution in Naturally Ventilated Tropical Greenhouses. *Biosystems Engineering*. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.08.005.

PERALES A.; PERDIGONES A.; GARCÍA J.L.; MONTERO J.I. Y ANTÓN A. (2003). El control de la condensación en invernaderos. *Revista Horticultura* 168: 14-19.

PERDIGONES A.; GARCÍA J.L., LUNA L., MONTERO J.I., MUÑOZ P., (2004). Comparative tests and modelling of humidity control strategies in Mediterranean greenhouses placed in continental and coastal sites. *GREENSYS 2004. Leuven, Bélgica*.

PERDIGONES A.; PERALTA I.; NOLASCO J.; MUÑOZ M.A. Y PASCUAL V. (2004). Sensores para el control climático en invernaderos. [Sensors for climate control in greenhouses]. *Revista Horticultura* 179: 44-49.

PERDIGONES A. Y PASCUAL V. (2005). Interaction of crop and cooling equipment on greenhouse climate. *Proc. IC on Greensys. Acta Horticulturae* 691. ISHS 2005.

PERDIGONES A; GARCÍA J.L.; PASTOR M.; BENAVENTE R.M.; LUNA L.; CHAYA C. Y DE LA PLAZA S. (2006). Effect of Heating Control Stategies on Greenhouse Energy Efficiency: Experimental Results and Modeling. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 49 (1): 143-155.

PÉREZ J.; LÓPEZ J.C. Y FERNÁNDEZ M.D. (2002). La agricultura del Sureste: Situación actual y tendencias de las estructuras de producción en la horticultura almeriense. *La agricultura Mediterránea en el siglo XXI.* Álvarez-Coque J.M.G. (Ed.). Instituto Cajamar. Almería: 262-282.

PÉREZ-PARRA J. (2002). Ventilación natural en invernadero tipo parral. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. Córdoba.

PÉREZ PARRA J.; BAEZA E.; MONTERO J.I. Y BAILEY B.J. (2004). Natural Ventilation of Parral Greenhouses. *Biosystems Engineering* 87 (3): 355-366.

PIETERS J.G.; POLLET I.V.; DELTOUR J. Y VERSCHOORE. (2003). Angular dependence of forward scattering induced by condensate on greenhouse cladding materials. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 23-36.

POLLET I.V. Y PIETERS J.G. (2002). PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 285-298.

REICHRATH S. Y DAVIES T.W. (2001). Using CFD to model the internal climate of greenhouses: Past, present and future. *Agronomie* 22: 3-19.

REISS E.; BOTH A.J. Y MEARS D.R. (2005). Comparing Greenhouse Floor Heating Designs Using CFD. *CCEA, Center for Controlled Environment Agriculture.* Cook College, Rutgers University.

ROY J.C.; BAILLY Y. Y BOULARD T. (2000b). Characterisation of the natural convection in a heated greenhouse. *9th International Symposium on Flow Visualization.* Edinburgh. UK. Paper 254.

ROY J.C.; BOULARD T.; KITTAS C. Y WANG S. (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering* 83 (1): 1-20.

SANZ DE GALDEANO J.; URIBARRI A.; SÁBADA S.; AGUADO G. Y DEL CASTILLO J. (2001). Invernaderos fríos, su manejo en invierno. *Navarra Agraria*, Noviembre - Diciembre 2001: 29-35.

SEGINER I. Y ZLOCHIN I. (1997). Night-time greenhouse humidity control with a cooled wetness sensor. *Agricultural and Forest Meteorology* 85: 269-277.

SEGINER I. (2002). The Penman-Monteith evapotranspiration equation as an element in greenhouse ventilation design. *Biosystems Engineering* 82 (4): 423-439.

SENTELHAS P.C. (2001). Agrometeorología aplicada á irrigaçao. In: MIRANDA J.H. Y PIRES R.C. DE M. *Irrigaçao. Piracicaba: FUNEP*: 63-120.

SORIANO T.; MONTERO J.I.; SÁNCHEZ-GUERRERO M.C.; MEDRANO E.; ANTÓN A.; HERNÁNDEZ J.; MORALES M.I. Y CASTILLA N. (2004). A Study of direct radiation transmision in asymmetrical multi-span greenhouses using scale models and simulation models. *Biosystems Engineering* 88 (2): 243-253.

SPANOMITSIOS G.K. (2001). Temperature Control and Energy Conservation in a Plastic Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80 (3): 251-259.

STANGHELLINI C. Y DE JONG T. (1995). A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76: 129-148.

TANNY J.; COHEN S. Y TEITEL M. (2003). Greenhouse microclimate and ventilation: An experimental study. *Biosystems Engineering* 84 (3): 331-341.

TCHAMITCHIAN M.; MONTBROUSSOUS B.; JEANNEQUIN B. Y MARTIN-CLOUAIRE R. (1997). SERRISTE : Daily greenhouse climate set point determination for tomatoes. In: *Mathematical and Control Applications in Agriculture* (Munack A.; Tantau H.J., eds). IFAC Workshop, Hannover, Germany, 25-30, Pergamon-Elsevier. Oxford.

TECNOLOGÍA DE INVERNADEROS. (2002). Apuntes del curso impartido por el departamento de Ingeniería Rural de la E.T.S.I. Agrónomos de la U.P.M.

TEITEL M. Y SHLYKAR A. (1998). Pressure drops across insect-proof screens. *Transactions of the ASAE* 41 (6): 1829-1834.

TEITEL M.; TANNY J.; BEN-YAKIR D. Y BARAK M. (2005). Airflow patterns through roof openings of a naturally ventilated greenhouse and their effect on insect penetration. Biosystems Engineering. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.07.013.

TESI R. (2001). Medios de protección para la hortofruticultura y el viverismo. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

TRIGUI M.; BARRINGTON S. Y GAUTHIER L. (2001). A Strategy for Greenhouse Climate Control, Part I: Model Development. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78 (4): 407-413.

TRIGUI M.; BARRINGTON S. Y GAUTHIER L. (2001). A Strategy for Greenhouse Climate Control, Part II: Model Validation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 79 (1): 99-105.

URBAN L. (1997-a). Introduction a la production sous serre: La gestion du climat (Tomo 1). *Ed. Tec.-Doc. Paris.*

VALLS M. (2002). Formación y gestión del conocimiento en la agricultura Mediterránea. *La agricultura Mediterránea en el siglo XXI.* Álvarez-Coque J.M.G. (Ed.). Instituto Cajamar. Almería: 245-261.

DE VRIES D.A. (1963). Thermal Properties of Soils. In *W.R. van Wijk (ed.) Physics of Plant Environment.* North Holland, Amsterdam. 314 p.

WITTWER S.H. Y CASTILLA N. (1995). Protected cultivation of horticultural crops, worldwide. *Horttechnology* 5 (1):6-23.

WULLSCHLEGER S.D., DIXON M.A. Y OOSTERHUIS D.M. (1988). Field measurement of leaf water potencial with a temperature-corrected in situ thermocouple psychrometer. *Plant, Cell and Environment* 11 (3): 199-203.

www.infoagro.com (1994).AGROINFORMACIÓN. Los plásticos en la agricultura. Materiales de cubierta para invernaderos.

www.infoagro.com (2002).AGROINFORMACIÓN. El cultivo de la gerbera.

www.infoagro.com (2003a). AGROINFORMACIÓN. Tipos de invernaderos

www.infoagro.com. (2003b).AGROINFORMACIÓN. Control climático de invernaderos.

ZHANG Z.B. (2006). Shading net application in protected vegetable production in China. *Acta Horticulturae* 719: 479-482.

ZHAO Y.; TEITEL M. Y BARAK M. (2001). Vertical temperature and humidity gradients in a naturally ventilated greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78 (4): 431-436.

ZHIBIN Z. (1999). Update development of protected cultivation in mainland China. *Chronica Horticulturae* 39 (2): 11-18.