

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

**Escuela Politécnica Superior y Facultad de
Ciencias Experimentales**

Titulación: I.T.A. Mecanización y Construcciones Rurales



PROYECTO FIN DE CARRERA

***ANÁLISIS DEL MICROCLIMA DE
INVERNADEROS MEDITERRÁNEOS
CALEFACTADOS MEDIANTE ANEMOMETRÍA
SÓNICA TRIAXIAL Y TERMOGRAFÍA***

Directores:

Diego Luis Valera Martínez

Alejandro López Martínez

Jesús Manuel Portero Casas

Mayo 2014

INDICE

1. Interés y Objetivos.....	4
2. Antecedentes.....	7
2.1. Concepto de cultivo protegido.....	7
2.2. La agricultura protegida en Almería.....	8
2.3. Tipos de invernaderos.....	12
2.3.1. Invernadero parral plano.....	13
2.3.2. Invernadero raspa y amagado.....	14
2.3.3. Invernadero asimétrico.....	15
2.3.4. Invernadero multitunel.....	15
2.3.5. Invernadero Venlo.....	16
2.4. Condiciones climáticas de la región mediterránea.....	17
2.5. Exigencias climáticas de los cultivos de la provincia de Almería.....	19
2.6. Sistema de control climático en invernadero.....	20
2.6.1. Sistema de control climático pasivo.....	20
2.6.2. Sistema de control climático activo.....	21
2.6.2.1. Ventilación forzada.....	21
2.6.2.2. Sistema de refrigeración por evaporación de agua.....	22
2.6.2.3. Refrigeración paneles evaporativos.....	23
2.6.2.4. Sistemas de sombreo.....	24
2.6.2.5. Mallas sombreo, enclado de cubierta y mallas térmicas.....	24
2.6.3. Sistemas de calefacción.....	26
2.6.3.1. Sistema de calefacción por aire caliente.....	27
2.6.3.2. Sistema de calefacción por agua caliente.....	30
2.7. Estudios previos de sistemas de calefacción con calderas.....	38
2.8. La termografía en la agricultura.....	40
2.9. La anemometría sónica en la agricultura.....	41
3. Material y métodos.....	43
3.1. Diseño experimental.....	43
3.1.1. Invernadero 1.....	46
3.1.2. Invernadero 2.....	47
3.1.3. Invernadero 3.....	48
3.1.4. División de los invernaderos.....	49
3.1.5. Sistema de calefacción invernadero 2.....	50
3.1.5.1. Elementos del sistema.....	50
3.2. Cultivo.....	54
3.2.1. Cultivo durante ensayo de calefactores.....	54
3.2.2. Cultivo durante ensayo de calefacción mediante caldera de biomasa.....	54
3.3. Sistemas de medición y control.....	55
3.3.1. Sensores del clima.....	55
3.3.2. Estación meteorológica.....	55
3.3.3. Controlador climático.....	56
3.3.3.1. Consignas.....	57
3.3.3.1.1. Consignas sistema de calefacción invernadero 1.....	57
3.3.3.1.2. Consignas sistema de calefacción invernadero 2.....	57
3.4. Medida de velocidad del aire por anemometría sónica.....	58
3.4.1. Anemometría sónica tri-dimensional.....	59
3.4.2. Anemometría sónica bi-dimensional.....	60
3.5. Sistema de recogida de datos.....	61
3.5.1. Micrologger.....	61
3.6. Principios de la termografía.....	61
3.7. Cámara Termográfica.....	64

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

3.7.1. Fundamentos cámara termográfica.....	65
3.7.2. Cámara termográfica compacta	66
3.7.3. Cámara termográfica de mano.....	67
3.8. Métodos de cálculo.....	68
3.8.1. Eliminación de picos.....	68
3.8.2. Velocidad del flujo de aire.....	69
3.9. Ensayos experimentales.....	70
3.9.1. Análisis del microclima invernadero 1.....	70
3.9.1.1. Diseño experimental.....	72
3.9.2. Análisis microclima invernadero 2.....	74
3.9.2.1. Diseño experimental.....	74
3.9.2.2. ThermaCam researcher.....	78
3.9.2.3. Sat Report 2003.....	79
3.9.3. Análisis Microclima Periodo otoño-invierno 2011/2012.....	80
3.9.3.1. Statgraphics Plus 4.....	81
4. Resultados.....	84
4.1. Análisis microclima generado invernadero 1.....	84
4.1.1. Flujo aire interior.....	85
4.1.2. Microclima interior.....	87
4.1.3. Distribución temperatura interior.....	89
4.1.4. Consumo de gasoil durante ensayos con anemómetros.....	92
4.2. Análisis microclima invernadero 2.....	93
4.2.1. Distribución temperatura en las tuberías.....	94
4.2.2. Distribución temperatura en el cultivo.....	96
4.3. Análisis estadístico-mensual microclima de 3 invernaderos con distintos sistemas de control de clima.....	99
4.3.1. Temperatura media diaria.....	99
4.3.2. Temperatura media diurna.....	101
4.3.3. Temperatura media nocturna.....	102
4.3.4. Temperatura máxima diaria.....	103
4.3.5. Temperatura mínima diaria.....	104
4.3.6. Humedad relativa media diaria.....	105
4.3.7. Humedad relativa media nocturna.....	105
4.3.8. Concentración CO ₂	106
4.4. Consumo combustible invernadero 1 Y 2.....	107
5. Conclusiones.....	110
6. Futuros trabajos.....	113
7. Bibliografía.....	115

1. Interés y Objetivos

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La superficie actual de invernaderos en el mundo supera las 450.000 ha, con un continuo crecimiento. En Europa, este desarrollo se centra en los países mediterráneos, especialmente en zonas costeras, donde las condiciones climáticas son más favorables para el cultivo protegido. Actualmente cuenta con más de 40.000 ha de cultivos protegidos, donde unas 130.000 ha sin invernaderos.

España se ha situado a la cabeza de los países mediterráneos en superficie invernada (546 ha en 1.968 y 46.258 ha en 1.999), únicamente superada a escala mundial por China (200.000 ha) y Japón (60.000 ha) (Cobos y López, 1.997).

En España, la superficie invernada se dedica principalmente al cultivo de hortalizas, entre las que destacan el tomate, pimiento, judía, berenjena, calabacín, pepino y sandía.

Las estructuras de producción presentes en el área mediterránea, están muy representadas por el invernadero tipo parral, los cuales presentan un nivel tecnológico que atenúa la producción final.

Debido a la globalización del mercado y sistemas productivos, los agricultores deben incorporar nuevas técnicas para mantener su capacidad productiva y comercializadora. Actualmente, los consumidores han cambiado sus necesidades y exigencias, además de exigir mayor calidad, demandan respeto al medio ambiente. Todo ello hace necesario conocer mejor el sistema de producción del invernadero y de las plantas del interior del mismo, que dependen de numerosas restricciones climáticas, variaciones diarias del precio, exigencias medioambientales...

Estas nuevas tendencias muestran la necesidad de mejorar las prestaciones de las estructuras de producción. Ello hará mejorar la estructura y equipamiento del invernadero, permitiendo aumentar el control productivo, extendiendo los calendarios de producción a todo el año con una oferta de calidad definida y sostenida.

La incorporación de mejoras en las estructuras y en el equipamiento de las mismas, se está produciendo a un ritmo lento (invernaderos más altos, mejor estructura, nuevos sustratos, equipos control clima...) pero debe acelerarse el ritmo para poder mantener la competitividad frente a otras áreas productoras.

En la actualidad, esos cambios ya son perceptibles y se irán generalizando gracias a la mejora del conocimiento científico-técnico y de las exigencias del mercado. El número de invernaderos multitúnel ascenderá, del mismo modo que sus sistemas de control del clima y la fiabilidad de los mismos, pero la inversión inicial se incrementará respecto a la actual.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

El uso de la calefacción como sistema de control climático es uno de los métodos menos utilizados pero en países del norte de Europa son imprescindibles debido a presentar climas fríos. Para los países mediterráneos (climas cálidos) la incorporación de estos sistemas de control del clima es irrisoria, ya que actuaran como prevención de heladas muy puntuales.

Los cultivos bajo invernadero de la región mediterránea pueden producir durante todo el año; para ello se han adaptado los invernaderos a las necesidades climatológicas de la zona. Existen numerosos estudios relacionados con todo tipo de sistemas de control climático pero no es el caso de los sistemas de calefacción en la región mediterránea.

Para conseguir avanzar en la mejora de los invernaderos de nuestra región, se hace necesario estudiar como se adaptan los diferentes sistemas de calefacción a nuestro clima, estimar su funcionamiento y cuantificar su efecto sobre el clima y la producción.

Ante la situación en la que se encuentra la agricultura protegida de nuestra región, se ha decidido analizar, mediante termografía y anemometría sónica, el microclima de tres invernaderos de la provincia de Almería. Dos de ellos presentan distintos sistemas de calefacción (caldera y calefactores) y el tercero no posee calefacción, solamente esta equipado con ventilación natural.

El objetivo general del proyecto es contribuir a la mejora de los sistemas calefacción utilizados en la provincia de Almería (zonas mediterráneas). Para ello se han establecido varios objetivos específicos:

- 1) Caracterizar la distribución de temperatura en el interior de un invernadero mediterráneo con calefacción mediante calefactores.
- 2) Caracterizar la distribución de temperatura del sistema de tuberías de distribución de agua caliente y del cultivo en el interior de un invernadero mediterráneo equipado con un sistema de calefacción por tuberías de agua caliente y caldera de biomasa.

2. Antecedentes

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

El concepto de agricultura se ha basado tradicionalmente en actividades al aire libre que dependía exclusivamente de las condiciones climáticas del medio, suelo y agua. La presencia desfavorable de alguno de estos factores suponía limitar la producción hasta el punto de poder perder toda la producción.

Ante esta situación, se desarrollaron técnicas que atenuaban las limitaciones anteriores. Así surgió la agricultura protegida, que consiguió modificar total o parcialmente las variables ambientales haciendo que los cultivos se desarrollen con cierta independencia de los factores climáticos.

2.1. Concepto de cultivo protegido

El cultivo protegido se refiere a aquel cultivo sobre el que durante su desarrollo, se interviene modificando las condiciones climáticas sobre las que se desarrolla. Estas modificaciones permiten mejorar la producción (menor tiempo entre producciones y mayor número de producciones), calidad del cultivo... Las mejoras de las técnicas de control climático están directamente relacionadas con la calidad del cultivo y rendimientos del mismo.

La técnica de protección de cultivos se practica desde muy antiguo. Los romanos ya usaban estructuras móviles pudiendo sacarlas al exterior con condiciones favorables y trasladarlas a cubierto cuando sea necesario. Tras los romanos desaparecieron y no sería hasta el Renacimiento (Siglos XVI a XVIII) cuando aparecieron los precursores de los actuales invernaderos, en Europa (Inglaterra, Francia y Holanda) y Asia (Japón y China). Inicialmente eran estructuras de bambú o madera cubiertas de vidrio o papel aceitado. Tras la segunda guerra mundial se extendió la construcción de invernaderos de vidrio. Mas tarde y gracias a la aparición de los plásticos, se expanden los invernaderos en Oriente y países mediterráneos (Castilla, 2.007). El uso de plásticos permitió usar estructuras menos resistentes y más económicas (debido al menor peso de la cubierta).

2.2. La agricultura protegida en Almería

El inicio del crecimiento de la agricultura almeriense se fecha en la década de los cincuenta y se basa en la especialización del cultivo intensivo de hortalizas en pequeñas explotaciones familiares, que contrastan con la agricultura en grandes superficies.

Con el uso de los invernaderos, se amplían las especies a cultivar, ciclos de cultivo... En las últimas décadas la agricultura almeriense ha sufrido una profunda y rápida transformación que continua hoy día. Se ha pasado de un aprovechamiento mínimo de terrenos semiáridos a una agricultura tecnificada que es capaz de obtener grandes producciones.



Figura 1. Evolución invernaderos en Almería. Año 1.974 (izq); año 2.013 (decha).

La mayor parte de los invernaderos de la provincia se distribuyen en las zonas costeras, que poseen terrenos llanos y climas más favorables (Figura 1). Así podemos distinguir cuatro grandes zonas de concentración de invernaderos.

- Comarca del Poniente

Se trata de la mayor superficie invernada de la provincia y representa la mayor concentración de invernaderos a nivel mundial. Esta comarca esta formada por Adra, Berja, Dalías, El Ejido, La Mojonera, Roquetas de Mar, Vicar Enix y Félix.

- Comarca Vega de Almería o Bajo Andarax

Está formada por los municipios de Santa Fe de Mondújar, Rioja, Gádor, Benahadux, Pechina, Viador, Huacal de Almería y Almería. La superficie invernada de esta comarca crece lentamente debido al poco terreno disponible (núcleo urbano de Almería por lado y Parque Natural Cabo de Gata-Nijar por el otro lado).

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Comarca Campo de Nijar

La comarca de Nijar es la segunda área con mayor número de invernaderos de la provincia de Almería. Se trata de una región en constante crecimiento ya que existe gran superficie sin invernar. Esta comarca está formada por los municipios de Nijar y Carboneras.

- Comarca del Almanzora

Se sitúa en el Nordeste de la provincia, entre Murcia, la sierra de las Estancias y el río Aguas. Comprende los municipios de Huerca-Overa, Pulpí, Cuevas del Almanzora, Antas, Vera, Garrucha, Mojacar, Turre, Los Gallardos y Bedar. La mayor parte de los invernaderos de esta comarca se concentran en los municipios de Pulpí, Cuevas del Almanzora, Vera y Antas.



Figura 2. Principales zonas costeras invernadas

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La superficie invernada ha ido creciendo desde principios de los setenta hasta la actualidad. Si es cierto que hasta la campaña de 1.997/1.998 se produce un elevado incremento del número de invernaderos pero a partir de esa campaña desciende el ritmo de crecimiento.

La tabla 1 ilustra la evolución de la superficie de invernaderos en la provincia de Almería.

Tabla 1. Evolución superficie invernada. Fuente: Junta Andalucía 2002

AÑO	EXTENSIÓN DE INVERNADEROS (ha)
1.963	0,05
1.971	1.114
1.976	3.440
1.981	8.250
1.985	13.200
1.990	19.000
1.995	23.500
1.998	27.690
1.999	27.800
2003	26958
2004	27000
2012	29991

La superficie de invernaderos en Almería para la campaña 2.009/2.010 fue de 37.480 ha (Arcos, 2.010), y la superficie invernada cercana a las 26.500 ha (Fundación Cajamar, 2010), siendo la mayor concentración de invernaderos a nivel mundial. Para la campaña de 2011/2012 se incremento la superficie invernada un 1,4%. Actualmente la provincia de Almería cuenta con una superficie invernada cercana a las 30.000 ha.

La agricultura intensiva puede considerarse líder en el sector agropesquero de la provincia de Almería tanto en exportación como producción. Según datos del anuario de Agricultura Almeriense (Arcos, 2.010), el sector hortofrutícola llegó a 2.759.260 toneladas de producción, siendo un poco inferior a las 2.881.539 toneladas del año anterior aunque el valor de comercialización se incremento en un 2,2% durante la campaña 2.009/2.010, alcanzando 2.163 millones de euros, superando los 2.115 millones de euros del 2.008/2.009. En la campaña 2011/2012 se aumento la producción hortofrutícola un 5,64 %, llegando a los 2.973.614 toneladas.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

El sector hortícola almeriense muestra un crecimiento positivo respecto años anterior. En la campaña 2.009/2.010 el sector de frutas y hortalizas incrementó el número de exportaciones en un 2,3% respecto al año anterior (campaña 2.008/2.009), incrementándose su valor en un 1,4%. El volumen exportado supuso un 60,8% de la producción total (Fundación Cajamar, 2.010).



Figura 3. Imagen invernaderos de Almería
Extraída de: dosisfotografica.blogspot.com.es

2.3. Tipos de invernaderos

En Almería, los invernaderos mas extendidos se conocen como “invernadero Almería” o tipo “Parral”, nombre que reciben por los antiguos párrales donde se cultivaba uva de mesa. El paso del parral para uva, constituido por palos de madera sobre los que se colocan una malla de alambre, hasta el invernadero, se produjo tras incorporar una segunda malla de alambres y un plástico entre ambas.

Inicialmente estas estructuras eran planas y se usaba plástico perforado (aprovechar el agua de lluvia y evitar caída de la cubierta por el peso). Estos invernaderos se llamaron “Parral Plano”. Posteriormente se dio pendiente a la cubierta, que permitió evacuar el agua de lluvia. Con este tipo de invernaderos surgen dos tipos de invernaderos: uno de capilla simple o “a dos aguas” con cubierta de pequeña inclinación y el multicapilla o “raspa y amagado” que posee una cubierta con mayor inclinación. El multicapilla asimétrico es la evolución del raspa y amagado y se caracteriza por tener diferente inclinación en sus vertientes.

La elección de una estructura u otra dependerá de las condiciones climáticas de la zona, nivel de tecnificación deseado y tipo de cultivo. En países de climas fríos se requieren materiales de cerramientos rígidos, como el vidrio, lo que hace recurrir a estructuras mas resistentes como el invernadero tipo Venlo. Países con menos exigencias climáticas, suelen recurrir a estructuras menos resistentes. Para un control exhaustivo del clima (semilleros, centros de investigación...) será necesario utilizar invernaderos multitúnel o Venlo con cubierta plástica, puesto que son mas herméticos y permiten la incorporación de cualquier tipo de sistema de control climático.

Los invernaderos mas importantes en la provincia de Almería son: el invernadero Almería tipo parral plano (32,2% de la superficie invernada), Raspa y amagado y asimétrico (62,5% y 2,4% de la superficie respectivamente) y el invernadero multitúnel. Aun así, en la actualidad el número de invernaderos multitúnel y Venlo esta aumentando, dando una idea del desarrollo que están sufriendo en detrimento del tradicional parral plano.

2.3.1. Invernadero Parral Plano

Estos invernaderos se constituyen básicamente de dos elementos: una estructura vertical y otra horizontal. Tradicionalmente la estructura vertical estaba compuesta de palos de madera pero se han ido sustituyendo por soportes metálicos que poseen mayor vida útil y mejores propiedades, esta estructura se apoya en bloques de hormigón. El techo y paredes laterales están formados por dos mallas de alambre galvanizado que se tejen manualmente. Este doble alambre sirve de soporte para la cubierta plástica, que se coloca entre ambas mallas y se fija mediante amarres de alambre (crea perforación del plástico y pérdida de hermeticidad).

Este tipo de invernadero requiere la perforación de la cubierta para evitar el colapso de la estructura con la lluvia. Suele realizarse sobre los pasillos, evitando que el agua caiga sobre el cultivo.

La superficie media del invernadero Parral en Almería es de 5945 m² y la altura media es de 2.8 m (Céspedes *et al.*, 2.009).

Las ventajas de estos invernaderos son su bajo coste y su adaptabilidad a la forma de la parcela. Como inconvenientes presenta poca estanqueidad al agua de lluvia, ventilación escasa y bajo nivel de tecnificación.



Figura 4. Invernadero Plano

2.3.2. Invernadero Raspa y Amagado

Es una evolución del invernadero parral plano y se esta extendiendo en los últimos años. Su estructura y construcción es similar al Parral pero su diferencia esta en la cubierta con pendiente en cumbre. El ángulo de cumbre oscila entre 6° y 20°, siendo a mayor ángulo mejor captación de la radiación solar (Castilla, 2.007) y mayor resistencia estructural por mayor exposición a la acción del viento.

Su altura máxima en cumbre es de 3-4,2 m. La parte mas baja de la cubierta oscila entre 2 y 2,8 m y la altura de las bandas entre 2 y 2,5m. (Valera *et al.*, 2.004). Las “raspas” se apoyan sobre pies derechos, mientras que para los “amagados” las mallas de alambre se fijan al suelo mediante vientos y horquillas de hierro que se utilizan de soporte para las canaletas de desagüe del agua de lluvia. La superficie media del invernadero “Raspa y amagado” en Almería es de 8.717,6 m² (Céspedes *et al.*, 2.009).

Las ventajas frente al Parral plano (figura 4) son: mejor captación de radiación solar, mayor altura de cumbre, permite evacuación agua, mayor hermeticidad, permite mecanizar la apertura de ventanas y gran capacidad de incorporar nuevas tecnologías de control climático.



Figura 5. Invernadero raspa y amagado

2.3.3. Invernadero Asimétrico

El invernadero asimétrico es una variante del Raspa y amagado en el que las vertientes de la cubierta tienen diferente inclinación para mejorar la captación de la radiación solar. La altura en cumbre oscila entre 3 y 5 m, mientras que la parte más baja de la cubierta se encuentra entre 2,3 y 3 m de altura y las bandas entre 2,1 y 3 m (Valera *et al.*, 2.004).

La superficie media de estos invernaderos en Almería es de 8.875 m² (Céspedes *et al.*, 2.009).

Estos invernaderos obtienen mayor precocidad y producción que los invernaderos tipo parral o raspa y amagado.

2.3.4. Invernadero Multitunel

Son invernaderos de cubierta semicilíndrica y estructura totalmente metálica, prescindiendo de las mallas de alambre usadas en los anteriores. Actualmente se utilizan tubos de acero galvanizado de sección cilíndrica o rectangular. La unión de piezas se realiza mediante tornillos, bridas o abrazaderas.

El plástico de la cubierta y los laterales se sujetan a la estructura mediante perfiles “omegas”. El extremo del plástico se introduce en la parte hueca de la pieza y se sujeta con tacos o gomas de polietileno.

Al no fijar la cubierta mediante alambres a la estructura se suelen utilizar cintas que se colocan en el exterior de la cubierta y la soportan sobre la estructura, evitando su rotura en días de fuertes vientos (Valera *et al.*, 2.004).

La altura máxima en cumbre oscila entre 4,5 y 6 m, y en las bandas laterales y bajo canal de 3 a 4 m. La altura media en cumbre es de 4,2 m (Céspedes *et al.*, 2.009). La superficie media del multitunel en la provincia de Almería es de 8.321,4 m² (Céspedes *et al.*, 2.009).

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Su gran ventaja es su capacidad para controlar los factores climáticos, que se debe a una mayor hermeticidad, apertura ventanas fácilmente mecanizable y permite instalar cualquier tipo de sistema de control climático. Su inconveniente es su mayor coste frente a los anteriores invernaderos.



Figura 6. Invernadero Multitunnel

2.3.5. Invernadero Venlo

Se caracterizan por el uso de cristal en la cubierta. Se diseñan de forma que quedan ser construidos fácilmente usando placas de cristal.

Su estructura es metálica y la cubierta tiene forma de capilla múltiple con una inclinación de 22° normalmente. La altura en cubierta de la cubierta puede llegar a los 6,5 m y presentar módulos de 6,4 a 12 m de ancho.

2.4. Condiciones climáticas de la región mediterránea

El clima mediterráneo resulta muy favorable para la instauración de este tipo de agricultura ya que cuenta con temperaturas medias invernales casi siempre superiores a 0°C y temperaturas estivales superiores a 30°C (Valera *et al.*, 2002).

Para la provincia de Almería, las temperaturas medias anuales se sitúan en torno a los 16-20°C en la mayor parte de la provincia y el riesgo de heladas es inferior a un día en las principales zonas de invernaderos, exceptuando el valle del Almanzora, que el riesgo de heladas asciende a menos de 10 días.

Las temperaturas medias mensuales oscilan entre los 12-13°C de enero y febrero y los 27°C de julio y agosto. Las temperaturas mínimas se producen en enero mientras que los meses de julio y agosto alcanzan las temperaturas máximas.

La precipitación media anual es de 200 mm mientras que la evapotranspiración potencial se sitúa en los 1.000 mm. Los fuertes vientos favorecen la ventilación natural.

La radiación solar es elevada a lo largo de todo el año, con valores de 80-120 W/m² en los meses de invierno y 250-300 W/m² en los de verano. Comparando con el periodo entre 1.934 y 2.003, en los últimos 10 años, ha aumentado la insolación (figura 6) durante todo el año mientras que la temperatura media del aire ha sido similar. Puede deberse a la expansión de los invernaderos. El reciente desarrollo de la horticultura intensiva en Almería estaría amortiguando el calentamiento global de la temperatura asociado al incremento global de gases de efecto invernadero (Campra *et al.*, 2008).

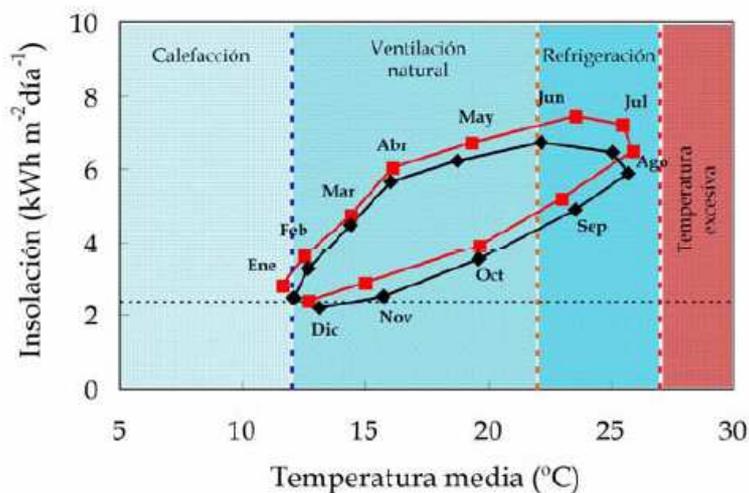


Figura 7. Insolación media diaria respecto temperatura media diaria.
◆ Años 1.934-2003; ■ años 2.000-2.009. Figura extraída de López, 2.011.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

En los últimos años los cultivos bajo invernadero de la provincia de Almería están sufriendo daños debido a condiciones climáticas desfavorables, que no resultan habituales en esta región. Algunos casos graves producidos en los últimos años pueden ser:

- Heladas de Febrero de 2.012

Olas de frío siberiano llegaron a Almería y produjeron grandes daños en la agricultura almeriense. Los cultivos bajo invernadero más afectados fueron el calabacín, tomate, pimiento, y pepino. Municipios como El Ejido, Pulpi, Lucainena de las Torres, Níjar o Dalias llegaron a temperaturas mínimas que apenas rebasaron los 0°C. Asaja estableció las pérdidas en 167,9 millones de euros para los sectores de cítricos, frutales de hueso y cultivos hortícolas. [Fuentes: lavozdeAlmería.es (7/02/12); elalmeria.es (10/03/12)].

- Nieve en invernaderos del Poniente, Enero 2.004

“Hacia más de cincuenta años que no nevaba en la comarca del poniente. Los invernaderos de El Ejido los más afectados por el frío, registrando mayor cantidad de nieve en Santa María del Aguila, Las Norias y San Agustín”. [Fuente: lavozdealmeria.es; eleconomista.es].

2.5. Exigencias climáticas de los cultivos en la provincia de Almería

Los cultivos que encontramos en los invernaderos de la provincia de Almería son de exigencias técnicas medias (tomate, pepino, pimiento, melón, sandía...). Estas especies son de estación cálida, adaptadas a temperaturas medias entre 17 y 28°C, con límites de temperaturas medias diarias de 12°C (mínimas) y de 32°C (máximas) (Nisen *et al.*, 1.988).

Siguiendo las publicaciones de Nisen *et al.* (1.988), Suelen ser poco resistentes al frío, pudiendo sufrir daños irremediables frente a heladas. La persistencia de temperaturas inferiores a 10-12°C durante varios días puede afectar a la producción, al igual que temperaturas superiores a 30°C o superiores a 30-35°C con humedad relativa alta.

Los requerimientos mínimos diarios de radiación solar se encuentran en torno a 200 cal cm⁻² d⁻¹ de radiación global en los tres meses más cortos del verano. También sería necesario una temperatura del suelo superior a 14°C y humedades relativas del aire entre 70-90% (Nisen *et al.*, 1.988).

Las principales exigencias climáticas de las hortalizas mencionadas son una radiación mínima de 2,35 Kw m⁻² d⁻¹ y una temperatura media del aire entre 17 y 27-28°C (Von Zabeltitz, 1.999).

Considerada la aptitud climática de Almería para estas especies, el principal sistema de climatización a considerar es la ventilación natural, que resulta imprescindible todo el año. En los meses más calurosos puede ser necesario disminuir la temperatura en el interior del invernadero recurriendo a sistemas como ventilación forzada, mallas de sombreado o sistemas de refrigeración mediante paneles evaporativos (Cooling System) y sistemas de nebulización (Fog System).

Los meses de invierno no suelen producirse descensos de temperatura por debajo del umbral mínimo ni heladas, por lo que los sistemas de calefacción no son tan necesarios, aunque según hemos visto en el primer capítulo, cada día se hace más necesaria su instalación.

La situación actual requiere mejores estructuras para poder defender el cultivo de cualquier inclemencia y garantizar buenas producciones. Al buscar la rentabilidad no podemos confiar en la suerte y bondad climática del año.

Por ello estudiamos los sistemas de calefacción, que permitirán controlar heladas, mantener la temperatura mínima biológica de los cultivos...

2.6. Sistemas de control climático en invernaderos

Los sistemas de control climático permiten modificar el microclima generado en el interior del invernadero estableciendo uno más favorable para los cultivos que se encuentran en su interior. Esta mejora del clima permitirá mayores producciones y mejores rendimientos de los cultivos.

Como hemos podido ver anteriormente, las condiciones climáticas de la zona de Almería no son muy exigentes y por ello la casi totalidad de los invernaderos de la provincia de Almería no cuentan con sistemas activos de control climático y se basan únicamente en sistemas de ventilación natural (sistemas pasivos).

2.6.1. Sistema de control climático pasivo (ventilación natural)

Se trata del método de refrigeración mas usado en la zona mediterránea. Su finalidad es disminuir las elevadas temperaturas y reducir el nivel de humedad relativa cuando es demasiado elevado.

Consiste en la colocación de ventanas en el invernadero (figura 8 y 9), y en función de la estructura, pueden ser ventanas laterales, cenitales o de ambos tipos. Las ventanas laterales permiten ser cerradas mientras que las cenitales no siempre permiten cerrarse.

Para evitar las entradas de insectos suelen instalarse mallas anti-insectos pero reducen la eficacia de la ventilación natural.



Figura 8. Ventana cenital



Figura 9. Ventana Lateral

2.6.2. Sistemas de control climático activo

En la provincia de Almería el número de invernaderos que cuentan con estos tipos de sistemas representan porcentajes muy bajos pero si es cierto que en los últimos años ha aumentado la tendencia a su instalación.

2.6.2.1. Ventilación Forzada

Consiste en aplicar extractores como complemento a la ventilación natural, su uso permite un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con ventilación pasiva.

Los extractores son colocados en un lateral del invernadero mientras que en el lateral opuesto se abren las ventanas. Normalmente se cierran las ventanas cenitales para forzar la circulación de aire de un lado al otro del invernadero.

La distancia entre dos ventiladores contiguos no debe ser superior a 7,5 m para asegurar la uniformidad en el flujo de aire (Valera *et al.*, 2.002). Además debe dejarse una distancia mínima sin obstáculos a la salida del aire de 1,5 veces el diámetro del ventilador.

Los extractores que se suelen instalar son de 0,5 a 1,2 m de diámetro, con valores de potencia que van desde 0,4 a 0,75 kW.



Figura 10. Ventilación forzada

2.6.2.2. Sistemas de refrigeración por evaporación de agua

Este método se basa propiedad del agua, que al pasar del estado líquido a vapor, absorbe calor. Por ello, al vaporizar agua en el invernadero, absorberá calor del invernadero disminuyendo la temperatura ambiente.

Se usan unos nebulizadores conectados a un sistema de tuberías que cuelgan de la techumbre del invernadero. Estos nebulizadores permiten distribuir en el aire un gran número de partículas de agua de pequeño tamaño (unos 10 μm). Al utilizar gotas tan pequeñas, se mantienen en el aire el tiempo suficiente para evaporarse.

Además de los nebulizadores, la instalación se completa con bombas, motores, inyectoros, filtros y equipos de control que permiten la automatización del sistema.



Figura 11. Nebulizadores

2.6.2.3. Refrigeración por paneles evaporativos (Cooling System)

Para estos sistemas se usan pantallas de material poroso que se saturan de agua mediante un equipo de riego. Dichas pantallas se sitúan a lo largo de todo un lateral o frontal del invernadero mientras que en el extremo opuesto se instalan extractores.

El aire del exterior entra hacia el panel evaporador absorbiendo humedad, provocando una bajada de la temperatura. Al pasar el aire seco y caliente del exterior, atraviesa el panel y se enfría al producirse la evaporación del agua que circula por los paneles.

Los paneles suelen construirse con fibras como las virutas de madera o con materiales celulósicos en láminas corrugadas y pegadas con aditivos.



Figura 12. Pantalla evaporadora

2.6.3. Sistemas de sombreo

El uso de estos sistemas pretende reducir la temperatura y disminuir la evapotranspiración de la planta.

2.6.3.1. Mallas de sombreo, encalado de la cubierta y mallas térmicas

Las mallas de sombreo y el encalado de la cubierta se instalan con la misma finalidad, reducir la radiación solar dentro del invernadero.

Las mallas suelen ser de polietileno, polipropileno, poliéster o de derivados acrílicos. Con el fin de aumentar la reflexión, las laminas pueden metalizarse con aluminio (mallas aluminizadas). Estos elementos pueden desplegarse y replegarse mediante un sistema automatizado, a través de un controlador de tiempo, sensores de luz o temperatura...

El encalado de la cubierta consiste en blanquear las paredes y la cubierta del invernadero mediante carbonato cálcico o cal apagada. Se trata del sistema de sombreo mas extendido en la región mediterránea.

Por último, las mallas térmicas son iguales que las de sombreo pero se utilizan por la noche para mantener la temperatura del suelo.



Figuras 13 y 14. Mallas de sombreo

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Si comparamos la eficacia de las mallas de sombreo con el encalado, podemos ver que el encalado presenta una serie de inconvenientes respecto a las mallas de sombreo.

- Permanencia de la cal en el invernadero durante periodos cubiertos, ya que no permiten ajustar el grado de sombreo en función de las condiciones ambientales.
- La aplicación de la cal no es homogénea, por lo que existen diferencias en la cantidad de luz que llega a las plantas
- La limpieza de la cal no es homogénea, quedando manchas sobre la cubierta y paredes del plástico. A veces es preciso el empleo de ácidos, que dañan el plástico.

Quizás la única ventaja del encalado es su relativa efectividad y la economía de su uso.

2.6.4. Sistemas de calefacción

En la actualidad, los invernaderos equipados con sistemas de calefacción en la provincia de Almería representan tan solo un 0,5%. Dentro de este 0,5%, los sistemas de calefacción más empleados son los generadores de aire caliente (figura 14), tanto de combustión directa con un 54% del total de los invernaderos que poseen calefacción por aire, como de combustión indirecta con un 46%.

Los sistemas de calefacción con tuberías por las que circula agua a media temperatura (30-45°C) son algo menos usados. En último lugar, tenemos los sistemas de conducción de agua a través de tuberías a alta temperatura (90-95°C), debido al alto coste inicial y la falta de hermeticidad de casi todos los tipos de invernaderos.

La razón por la que los invernaderos de la provincia de Almería carezcan de estos métodos de control climático radica en las condiciones climáticas de la zona. Dichas condiciones climáticas han sido analizadas anteriormente en el punto 2.4 (condiciones climáticas de la región mediterránea).

Ahora pasaremos a estudiar los distintos sistemas de calefacción y los resultados de estudios de sistemas de calefacción realizados previamente a nuestro trabajo.

3.6.4.1. Sistemas de calefacción por aire caliente (convectivos)

Los sistemas de calefacción a través de aire caliente suelen aplicarse a invernaderos donde se pretende actuar rápidamente frente a riesgos de elevados descensos de temperatura durante un corto periodo de tiempo y pocas veces al año.

Estos sistemas elevan rápidamente la temperatura del aire pero también se enfría rápidamente al dejar de funcionar. Son sistemas poco eficientes, donde pueden observarse diferencias de temperatura entre la parte baja de las plantas y la parte alta, de 2-3°C (Urban, 1.997).

La calefacción por aire caliente consiste en hacer pasar aire a través de focos caloríficos y luego impulsarlo dentro de la atmósfera del invernadero. Para ello se usan generadores, que pueden ser de combustión directa o indirecta.

Para aumentar la eficacia del sistema, se pueden usar tubos perforados próximos a las plantas, que mejoran la distribución de calor.

- Generadores de aire caliente de combustión directa

Con estos generadores, tanto el aire caliente como los gases de combustión son incorporados al invernadero. El combustible a utilizar debe de contener el menor número posible de elementos tóxicos y por ello se suele usar propano o gas natural.

Es importante controlar los gases de combustión para evitar causar problemas a personas y plantas.

El rendimiento de los generadores de combustión directa se considera del 100 % al introducir también el calor que acompaña a los gases de combustión.



Figura 15. Generador aire caliente combustión directa

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Generadores de aire caliente de combustión indirecta

Este tipo de generador se diferencia del anterior en que consigue evitar la liberación de gases en el interior del invernadero, los cuales pueden resultar perjudiciales para el hombre y las plantas. Para conseguir evitar la liberación de gases se utilizan intercambiadores de calor.

Estos generadores introducen el aire caliente dentro del invernadero y expulsan los gases de la combustión fuera del invernadero. Debido a que parte del calor es expulsado con los gases de combustión, su rendimiento es menor que los generadores de combustión directa.

Este tipo de generadores están formados por un quemador de gasoil, uno o dos ventilares y los tubos por los que pasa el aire caliente antes de ser expulsado.

Los generadores pueden activarse de forma automática mediante termostatos o por programación, activarlos durante un periodo de tiempo. Para mejorarse la distribución del aire caliente se utilizan mangas de polietileno perforadas.



Figura 16. Generador aire caliente combustión indirecta



Figura 17. Mangas perforadas de polietileno

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

En los pocos invernaderos que presentan estos sistemas, su uso se limita a mantener la temperatura del interior por encima de 10°C, consiguiendo evitar temperaturas que provocan daños en el cultivo.

Las ventajas de los generadores de aire caliente, tanto de combustión directa como indirecta, son:

- Coste de inversión mesurado.
- Fácil instalación.
- Tiempo de respuesta corto.

2.6.4.2. Sistemas de calefacción por agua caliente

Estos sistemas se basan en hacer circular agua caliente o vapor de agua procedente de un foco calorífico (caldera, bomba de calor...) a través de un sistema de tuberías. El agua es calentada gracias a las calderas.

Estos sistemas están formados principalmente por un depósito de combustible o tolva, una caldera, un sistema tuberías de distribución, una bomba de impulsión y, accesorios de seguridad (presostatos, termostatos...) y regulación.

- Depósito o Tolva

Es el lugar donde se guarda el combustible o material. Este será introducido en el quemador de la caldera y de su combustión se producirá la energía necesaria para calentar el agua. Dependiendo del tipo de combustible, el depósito será de una forma u otra.



Figuras 18 y 19. Tipos de depósitos según material.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Caldera

Es el elemento más importante y sus características dependerán de la capacidad del mismo para generar calor.

Las calderas según su aporte calorífico, pueden ser de:

- Combustibles sólidos: carbón, biomasa residual (huesos de oliva, cáscara de almendra...).
- Combustibles líquidas: gasóleo y fueloil son los más usados, aunque este último, por su alta contaminación, no se recomienda.
- Combustibles gaseosos: propano y gas natural son los más utilizados, siendo el primero el único disponible en Almería en la actualidad.
- Eléctricas

Según el tipo de combustible, pueden ser:

- Caldera de gasoil: son aquellas que usan gasoil o gasóleo. Son más baratas y tienen un mantenimiento más sencillo pero contaminan más que las que usan gas natural o biomasa. Resultan bastante eficaces y rápidas.
- Calderas eléctricas: poseen una entrada de agua fría y una salida de agua caliente. Su rendimiento está en torno al 99,8%, es un sistema libre de contaminación y no produce ruidos.
- Caldera solo de pellets: suelen ser pequeñas (hasta 40 kW) y altamente eficientes.
- Calderas de biomasa: su tamaño va desde 25 kW a cientos de kW. No admiten varios combustibles simultáneos pero se puede cambiar el combustible si se programa con antelación el vaciado del silo, nueva recarga y reprogramación de la caldera.
- Calderas mixtas o multicomcombustible: admiten diferentes combustibles, cambiando de unos a otros de manera rápida y eficiente. Pueden ser de tamaño medio (hasta 200 kW) o grandes.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Si atendemos a su tecnología, pueden dividirse en:

- Calderas convencionales adaptadas a biomasa: su eficiencia es reducida (75-85%). Suelen ser semi-automáticas y al no estar diseñadas para biomasa, no disponen de medios adecuados para su mantenimiento y limpieza.
- Calderas eficientes de biomasa: diseñadas específicamente para un biocombustible determinado, alcanzando rendimientos de hasta el 92%.



Figura 20. Caldera biomasa

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Calderas mixtas: permiten el uso alternativo de dos combustibles. Precisan un almacenamiento y sistema de alimentación de la caldera diferente para cada combustible, por lo que la inversión es mayor.



Figura 21. Caldera mixta

- Tuberías

Es el elemento que permite aportar calor al clima interior del invernadero. Dependiendo del tipo de circuito de tuberías, número de tubos y disposición del mismo, aportarán más o menos calor.

En los sistemas convencionales el agua circula a temperaturas en torno a 50-80°C y alturas de 0,3 a 1 metro del suelo.

Los tubos más usados son circulares aunque existen otros tipos y pueden colgarse de cadenas para desplazarlos según crezca el cultivo. Suelen ser de acero o aluminio.

La transferencia de calor de los tubos de calefacción dependerá del tubo empelado y la diferencia térmica entre el tubo y el aire del invernadero.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Tuberías sobre el suelo

Se coloca el sistema de tuberías sobre el suelo, a unos 15-20 cm mediante bancadas (pinzas metálicas), en las que circula agua caliente a alta temperatura. El agua de entrada al invernadero se sitúa a 80-90°C y la del retorno (la que vuelve a la caldera) en unos 50-60°C.

Las tuberías pueden ser de aluminio, de 28 mm de diámetro, o de acero de 51 mm. Las de acero permiten ser usadas como raíles, ayudando a su uso para carros de transporte...

Este es el método mas usado en los actuales invernaderos multitunel (tuberías de agua caliente a alta temperatura).



Figura 22. Tuberías sobre el suelo

- Tuberías alrededor del cultivo

Este sistema hace circular agua a media temperatura (30-50°C) alrededor del cultivo. Las tuberías son de polipropileno, de unos 15-16 mm de diámetro que se colocan en torno al cultivo.

Al estar a una temperatura menor, se colocan las tuberías más próximas al cultivo y se usan un mayor número de tuberías.

Este sistema permite el empleo de materiales más económicos que las tuberías de acero o aluminio, como el polietileno de alta densidad o el polipropileno (Barret et *al.*, 1.978).

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Biomasa

La diferencia de este tipo de calderas con el resto, se encuentra en el material que utiliza como fuente de energía. Normalmente se utilizan combustibles fósiles pero en nuestro caso vamos a utilizar biomasa.

Para facilitar su uso y manipulación en las calderas, se suelen transformar en:

- combustibles sólidos (pellets, astillas...)
- combustibles líquidos (biodiesel y bioetanol)
- Combustibles gaseosos: biogás.

En nuestro ensayo se utilizaron combustibles sólidos como el orujillo (huesos de aceitunas), cuyas características son las siguientes:

Tabla 2. Características diferentes combustibles sólidos. Extraído de revista *Navarra Agrícola*, número de Julio-Agosto de 2007.

Combustible	Humedad %	Cenizas %	Kg para generar misma energía q 1 L gasoil
Pellets Madera	Max 10	1	2,10
Astilla Haya/encina	25	1,10	2,88
Serrín y virutas	10	1	1,98
Orujillo de oliva	15	7	2,30
Cascara almendra	10	1	2,20
Hueso aceituna	15	1	2,06

El material usado por los excedentes producidos en procesos naturales e industriales, el orujillo y hueso de oliva derivados de la fabricación del aceite de oliva; el excedente y serrín de empresas madereras que acaban siendo pellets o la propia cascara de almendra

La peletización es el mayor intento de estandarización de la biomasa sólida. Así se logra mayor uniformidad en el tamaño y densidad, lo que permite una reducción de los costes de transporte del mismo.

Su presentación comercial es similar al aspecto de los piensos, en formas cilíndricas de 1-2 cm de longitud.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Funcionamiento caldera biomasa

La alimentación de la caldera se realiza a través de un tornillo sinfín que va desde la tolva (lugar donde se almacena el material) hasta la caldera.

Dos circuitos de aire circunvalan la cámara de combustión. El llamado aire primario, inyecta aire en la cámara para aportar oxígeno y así activar y mejorar la combustión.

Normalmente una combustión de este tipo presenta cenizas y volátiles inquemados en los gases de combustión, que pueden reducir el rendimiento de la caldera. Por ello, se inyecta aire secundario para provocar una nueva combustión de gases de destilación y de las partículas sólidas en suspensión.

El humo generado se acumula en el techo de la cámara de combustión, desde donde es forzado a salir hacia la chimenea. Al quemar biomasa se produce algo de ceniza, que se recoge generalmente de manera automática en un cenicero que debe vaciarse periódicamente.

El calor generado durante la combustión del material es transmitido al circuito de agua en el intercambiador incorporado en la caldera, lugar desde el cual se suministra el agua caliente que circula por las tuberías del invernadero.

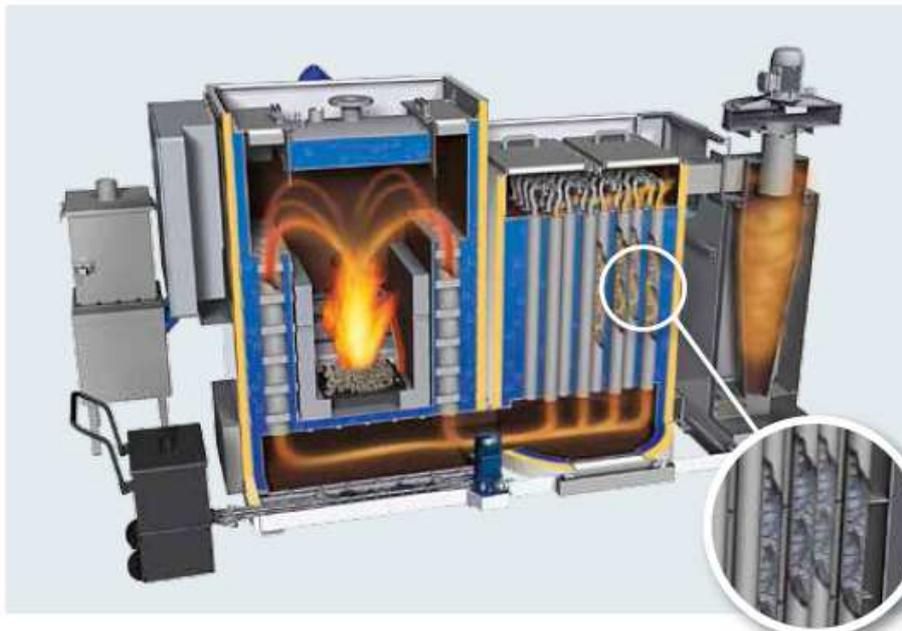


Figura 23. Esquema caldera biomasa. Extraída de manual Lasain calderas industriales.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Las razones que justifican el uso de este tipo de calderas son:

- El biocombustible es más económico que los combustibles fósiles.
- Se trata de un combustible ecológico con un ciclo de emisión de gases de efecto invernadero nulo.
- Continúas subidas del precio del gas natural y del gasóleo.
- La biomasa en todas sus formas (pellets, huesos aceituna...) contribuyen al desarrollo sostenible del planeta.
- El almacenaje de la biomasa no presenta riesgo de explosión, ya que no es volátil.
- La biomasa es un combustible no toxico e inocuo para la salud y no presenta olores desagradables.
- Las operaciones de mantenimiento de estos sistemas son de fácil solución, ya que son sistemas automáticos, con funcionamientos sencillos.
- Las calderas de biomasa oponen una alta resistencia al desgaste, tienen larga vida útil y presentan un buen rendimiento energético, superando el 80-85 % de eficacia.

2.7. Estudios previos de sistemas de calefacción con calderas

Vamos hacer referencia a distintos estudios realizados con anterioridad al nuestro y que nos permitirán tener una idea de las aplicaciones de estos sistemas de calefacción, como afectan a distintos climas, rendimientos de los cultivos...

Todos los ensayos seleccionados se han realizado en regiones mediterráneas, debido a la igualdad de climatología con nuestra provincia. Estas zonas son Grecia (N. Tadj *et al.*, 2.010) y España (Bartzanas *et al.*, 2.005; Perdigones *et al.*, 2.006; J.C. López *et al.*, 2.000 y 2.008; M. Nachidi *et al.*, 2.010).

Algunos de estos estudios demostraron que manteniendo una temperatura constante de 20°C en el interior del invernadero, se produce una mejora en la producción, aunque también se eleva el consumo de energía (J.C. López *et al.*, 2.008).

El estudio realizado por Nachidi *et al.* (2.010) afirma que para aumentar la producción es necesario conseguir elevar la temperatura nocturna del invernadero en torno a los 14°C. Una vez conseguido elevar la temperatura del invernadero, se buscó el sistema más eficiente.

Sistemas como los basados en tuberías de agua caliente llegaron a establecer diferencias de temperatura interior-exterior del invernadero de 10°C mientras que con calefactores se llegó a una diferencia interior-exterior de 15°C (Bartzanas *et al.*, 2.005).

El trabajo realizado por N. Tadj *et al.* (2.010) nos sirvió de referencia a la hora de realizar nuestros estudios. En este ensayo realizaron un estudio del rendimiento de un invernadero utilizando un sistema de calefacción mediante tuberías de agua caliente, calefacción mediante calefactores y, mediante el uso combinado de ambos sistemas. El invernadero se ubicaba en Grecia y se realizó durante el invierno de 2.007 con un cultivo de tomate.

Se midió la temperatura y velocidad del aire en distintos puntos durante cinco minutos, para normalizar la medida de los distintos puntos colocaron un anemómetro fijo en el centro del invernadero.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- La combinación de ambos sistemas de calefacción dieron altas velocidades del aire, altas temperaturas en el interior del invernadero y consumos de energía más elevados que cualquier sistema solo.
- Usando solamente la calefacción por tuberías, el cultivo se encontraba mas caliente que el aire circundante, mientras que combinando los dos sistemas de calefacción el cultivo estaba mas frío que el aire circundante.
- La condensación de la cubierta fue eliminada o reducida al mínimo con los sistemas combinados. Cuando se usó únicamente la calefacción por tuberías, si se observó condensación.
- El uso de ambos sistemas da lugar a una distribución más heterogénea del microclima, mientras que con tuberías solamente, se da un microclima mas uniforme.

2.8. La termografía en la agricultura

El uso de la termografía para medir la temperatura de los objetos es una técnica en auge, hasta el punto de aplicarse para la agricultura. Esta técnica se usó para el estudio de masas forestales (Chapman, 2.007; Leuzinger y Corner, 2.007), visualización de daños provocados por temperaturas bajo cero en plantas (Pearce y Fuller, 2.001), para el estudio de la temperatura de cultivos ornamentales (Lamprecht *et al.*, 2.002)...

El trabajo realizado por Mahan y Yeater, (2.008) demuestra que medir la temperatura del aire resulta fácil pero medir la temperatura de los cultivos resulta más difícil, sobre todo si se quiere realizar una medición continua.

La programación del riego en función de la temperatura del cultivo es una técnica que se usa en agricultura desde los años 60, como puede apreciarse en los trabajos realizados por Fuch y Tanner, (1.966), Jackson *et al.* (1.977)... pero el control del riego en función de la temperatura del cultivo puede no resultar interesante, puesto que la mayor parte de los riegos se realizan en intervalos de tiempo cortos con la finalidad de mantener niveles óptimos del potencial hídrico en el suelo.

La temperatura del cultivo se puede medir utilizando termómetros de infrarrojos (IRTs) pero con la aparición de las cámaras infrarrojas se hace posible la monitorización de la distribución espacial de la temperatura de las plantas (Heilman *et al.*, 1.992) y (Grant *et al.*, 1.989). Las ventajas de este método radican en que no es necesario el contacto físico con las plantas ya que las imágenes muestran gran superficie, y la toma y almacenamiento de datos es sencilla. Estas ventajas se muestran en el estudio realizado por Mahan y Yeater, (2.008).

2.9. La anemometría sónica en invernaderos

La anemometría sónica es ideal para medir la velocidad del aire y la distribución de temperatura del aire en el interior del invernadero. Este método permite descubrir los parámetros del flujo de ventilación natural del invernadero para los vientos predominantes de la zona y estudiar la influencia sobre la ventilación de obstáculos próximos a las paredes del invernadero. Además, permite estudiar las características de la turbulencia del flujo de aire, propiedad muy importante en flujos de aire naturales, ya que los flujos de turbulencia tienen mayor capacidad para transportar el calor y para mezclarse que los flujos laminares (Pope, 2.000).

Los primeros estudios mostraron su idoneidad para caracterizar el flujo de aire en las ventanas (Boulard *et al.*, 1.996). Otros autores como Wang y Deltour, (1.997, 1.999a y 1.999b) o Wang *et al.* (1.999a y 1.999b) recurrieron a la anemometría para caracterizar el flujo de aire en el interior de invernaderos. Todos estos estudios se centraron en analizar el flujo de aire (velocidad y dirección) pero no se profundizó en el estudio de las características de la turbulencia.

La anemometría sónica permite obtener los valores de velocidad del aire en las tres direcciones del espacio, además de permitir la separación del valor medio y la componente turbulencia del flujo. Boulard *et al.* (1.996) estudiaron las características turbulentas del flujo de aire, que contribuyen al flujo de calor y, al transporte y mezcla de sustancias. Este tipo de flujos permite transportar y mezclar flujos de forma más eficiente que los flujos laminares (Pope, 2.000).

3. Material y métodos

3.1. Diseño Experimental

Este estudio se ha realizado en tres invernaderos Mediterráneos ubicados en el campo de prácticas de la Universidad de Almería, en la finca experimental “Catedrático Eduardo Fernández” de la fundación UAL-ANECOOP (Longitud: 2° 17' O, Latitud: 36° 51' N y Altitud: 90 m), en la provincia de Almería (Fig. 24 y 25).



Figuras 24 y 25. Localización invernaderos del estudio

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Dentro de la finca se distribuyen según la figura 26:

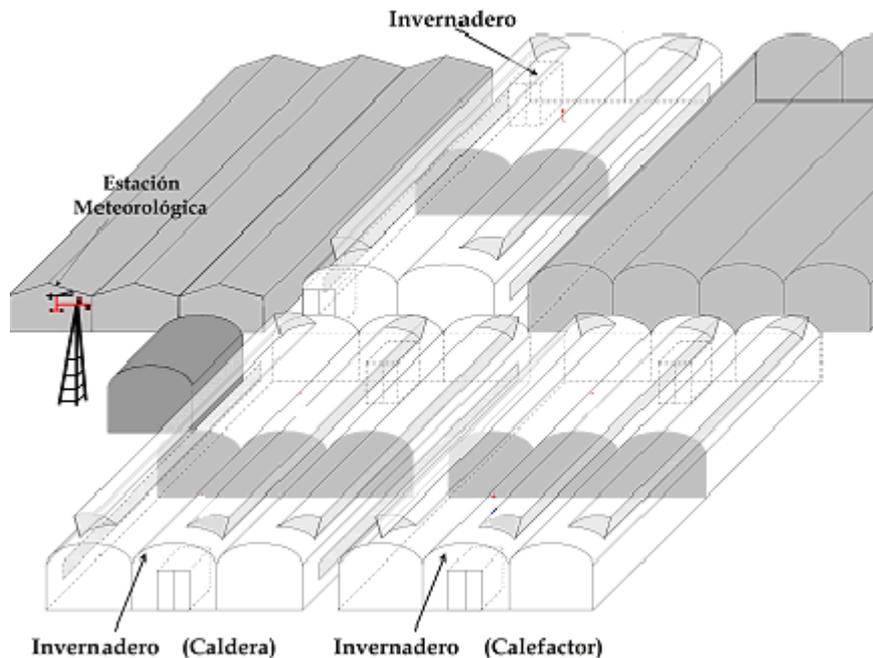


Figura 26. Distribución invernaderos

Los tres invernaderos son de estructura multitúnel, con los laterales de policarbonato rígido y la cubierta de plástico tricapa coextruido de polietileno de baja densidad, con alto contenido de copolímero EVA en la capa intermedia que aporta transparencia, termicidad y flexibilidad (copolímero EVA 3C genérico, incoloro difuso, espesor 200 μm , transmisividad a la luz visible del 88%, a la luz difusa del 25% y a la radiación infrarroja del 17%), en la capa exterior el bajo contenido en copolímero EVA aporta rigidez y resistencia al rasgado. La orientación de los tres invernaderos es Este-Oeste.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

El equipamiento y las características principales de los invernaderos se resumen en la tabla 3.

Tabla 3. Equipamiento invernaderos ensayo. *N*: número invernadero; *L*: longitud; *A*: ancho;

N°	L	A	Ventil Natural	Desestratificador	Sombreo	Calefacción
1	45	24	Cenital	Si	Si	Calefactores
2	45	24	Lateral+Cenital	Si	Si	Caldera
3	45	18	Lateral+Cenital	Si	Si	No

La malla de sombreado utilizada es del tipo aluminizada, modelo Aluminet 50-I (Polysack Plastic Industries Ltd., Israel). Las características indicadas por el fabricante son: porcentaje de sombra del 50-54%, reflexión 50% y transmisividad a la luz difusa 65%. Cada invernadero posee cuatro ventiladores recirculadores o desestratificadores EDC24 (Munters Europe AB, Sollentuna, Suecia), dos orientados hacia el sur y dos hacia el norte de forma alternativa.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

3.1.1 Invernadero 1

Este invernadero posee una superficie de 1080 m², dividido en dos sectores, el *Este* con 600 m² y el *Oeste* de 480 m². Contiene una malla de sombreado aluminizada Aluminet 50-I (Polysack Plastic Industries Ltd., Israel; 50-54% sombreado/porosidad). La ventilación natural se realiza mediante ventanas cenitales (tres ventanas cenitales de 0,97×22,5 m² para el sector este y otras 3 de 0,97×17,5 m² para el sector oeste). No posee ventanas laterales debido a que cuenta con un sistema de refrigeración mediante paneles evaporadores.

Tabla 4. Ventilación invernadero 1. Ventanas [m²]

Invernadero	Sectores	Tipo ventana	Ventanas
1	Este	3 cenitales	0,97 × 22,5
	Oeste	3 cenitales	0,97 × 17,5

Además, se instaló un sistema de calefacción por aire caliente que se compone de dos calefactores de aire caliente Munters GP 80 (Munters AB, Kista, Sweden; potencia térmica 88 kW, salida neta 75.830 kcal h⁻¹; consumo máximo 8,3 kg h⁻¹), uno en la esquina noreste y otro en la esquina suroeste del invernadero. Para la distribución del aire en el interior del invernadero se utilizaron dos mangas de polietileno con nueve orificios con superficie elíptica (eje horizontal 14 cm; eje vertical 11 cm; distancia al suelo 22 cm).

Tabla 5. Características calefactores

MUNTERS GP 80		
Peso	Kg	120
Potencia Máxima	KW	99
Potencia de servicio	KW	88
Consumo Máximo gasoil	Kg/h	8,3
Eficacia	%	88,5
Potencia eléctrica nominal	W	1500
Flujo de aire	m ³ /h	5800
Tensión trifásico	V	230/400
Tensión monofásico	V	230

3.1.2 Invernadero 2

Se trata de un invernadero de iguales dimensiones y divisiones que el invernadero 1, además cuenta con ventanas laterales en la pared Sur y Norte, y tres ventanas cenitales. Las ventanas laterales del sector Este son de $1,05 \times 22,5 \text{ m}^2$ mientras que la cenital es de $0,97 \times 22,5 \text{ m}^2$. Para el sector Oeste la superficie de cada ventana lateral es de $1,05 \times 17,5 \text{ m}^2$ y $0,97 \times 17,5 \text{ m}^2$ por ventana cenital.

También posee una malla de sombreo aluminizada Aluminet 50-I (Polysack Plastic Industries Ltd., Israel; 50-54% sombreo/porosidad).

Tabla 6. Ventilación invernadero 2. Ventanas [m^2]; Superf Ventilación, expresado como superficie de ventana entre superficie del invernadero (S_V/S_A) [%]

Invernadero	Sectores	Tipo ventana	Ventanas
2	Este	3 Cenitales	$0,97 \times 22,5$
		2 Laterales	$1,05 \times 22,5$
	Oeste	3 Cenitales	$0,97 \times 17,5$
		2 Laterales	$1,05 \times 17,5$

Para este invernadero se instaló un sistema de calefacción por agua caliente donde el agua es proporcionada por una caldera de combustibles sólidos de biomasa (bioselect 350 Plus), siendo el combustible a utilizar, huesos de aceituna. Dicha caldera se encuentra situada en una nave anexa al invernadero y mediante un sistema de tuberías se conecta dicha caldera con el invernadero 2, inicialmente con el sector Este y seguidamente con el Oeste.

El circuito de agua del invernadero 2 se distribuye según la figura 27:

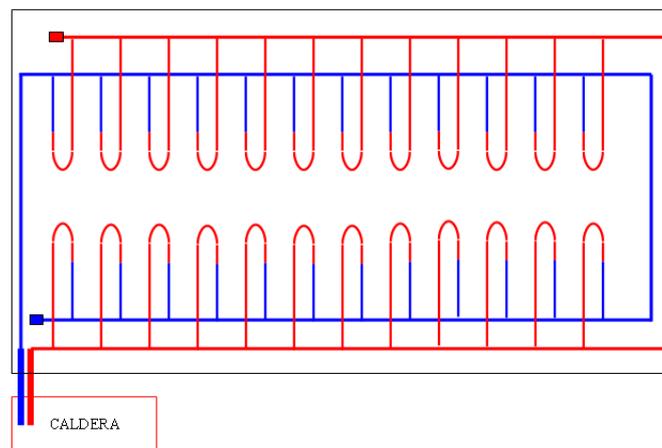


Figura 27. Distribución circuito calefacción

3.1.3 Invernadero 3

El invernadero 3 (Testigo), sin calefacción y sin malla aluminizada, solo contaba con ventilación natural para el control del clima. La ventilación natural en el invernadero 3 se consigue mediante la apertura de dos ventanas laterales y dos ventanas cenitales. Este invernadero presenta una peculiaridad, las puertas de acceso quedan en las esquinas Noreste y Noroeste del invernadero, reduciendo la superficie de la ventana lateral Norte. De este modo las superficies de ventilación quedan como sigue: en el sector Este la superficie de la ventana lateral Norte es de $1,05 \times 20 \text{ m}^2$, para la ventana lateral Sur de $1,05 \times 22,5 \text{ m}^2$ y para cada ventana cenital de $0,97 \times 22,5 \text{ m}^2$, resultando un total de $88,3 \text{ m}^2$, una superficie de ventilación del 19,6% respecto la superficie de suelo. En el sector Oeste la superficie de la ventana lateral Norte es de $1,05 \times 15 \text{ m}^2$, para ventana lateral Sur de $1,05 \times 17,5 \text{ m}^2$ y para cada ventana cenital de $0,97 \times 17,5 \text{ m}^2$, resultando un total de $68,1 \text{ m}^2$, una superficie de ventilación del 18,9% respecto la superficie de suelo.

Los tres invernaderos disponen de cuatro ventiladores recirculadores o desestratificadores EDC24 (Munters Europe AB, Sollentuna, Suecia), dos orientadas hacia el sur y dos hacia el norte de forma alternativa.

Tabla 7. Ventilación invernadero 3. Ventanas [m^2]; Superf Ventilación [m^2]

Invernadero	Sectores	Tipo ventana	Ventanas
3	Este	2 Cenitales	$0,97 \times 22,5$
		2 Laterales	$1,05 \times 20$
			$1,05 \times 22,5$
	Oeste	2 Cenitales	$0,97 \times 17,5$
		2 Laterales	$1,05 \times 15$
			$1,05 \times 17,5$

3.1.4 División de los invernaderos

Los tres invernaderos se han dividido en dos sectores: este y oeste. La división se realizó con un film tricapa parecido al empleado en la cubierta. En las ventanas de ambos sectores se han colocado mallas anti-insectos de diferentes propiedades. Con esta división se persiguen dos objetivos: aislar o separar las poblaciones de insectos en cada sector y evitar la mezcla de aire entre un sector y otro, posibilitando la creación de dos microclimas independientes.

Los sectores este de cada invernadero son los sectores testigo donde se coloca una malla de densidad de hilos 10×20 hilos cm^{-2} . De no usar estas mallas, la población de insectos perjudiciales para el cultivo sería demasiado elevada. En los sectores Oeste de los tres invernaderos se han colocado mallas de densidad de 13×30 hilos cm^{-2} . Las características geométricas de las mallas anti-insectos (Tabla 8) se han obtenido siguiendo una metodología desarrollada en el Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Almería (Álvarez, 2.010).

Tabla 8. Características geométricas de las mallas anti-insectos utilizadas en los invernaderos experimentales. D_r , densidad de hilo [hilos/ cm^{-2}]; φ , porosidad [%]; L_{px} , longitud del poro en el eje x [μm]; L_{py} , longitud del poro en el eje y [μm]; D_h , diámetro medio de los hilos [μm]; D_i , diámetro de la circunferencia inscrita en el poro [μm]; S_p , superficie media del poro [mm^2].

Sector	D_r	φ	L_{px}	L_{py}	D_h	D_i	S_p
Oeste	12.5×31.3	26.3	110.0 ± 7.9	611.9 ± 17.5	200.2 ± 13.1	113.5 ± 8.5	0.067 ± 0.005
Este	9.8×20.0	35.0	238.6 ± 19.5	746.0 ± 22.7	265.3 ± 11.9	241.7 ± 19.5	0.178 ± 0.015

3.1.5 Sistema de calefacción del invernadero 2

3.1.5.1 Elementos del sistema

El sistema de calefacción empleado en nuestro trabajo utiliza una caldera de biomasa Lasain (modelo Bioselect 325 Plus), con las siguientes características técnicas:

Tabla 9. Características técnicas caldera invernadero 2

BIOSELECT		
Potencia útil nominal	KW	325
Potencia útil mínima	KW	100
Consumo combustible	Kg/h	24,4-89,5
Rendimiento	%	89
Temperatura gases	°C	110-180
Peso	Kg	1950
Volumen de agua cuerpo	l	895
Diámetro salida humos	mm	250
Presión de trabajo máxima	bar	4
Temperatura máxima trabajo	°C	90
Alimentación eléctrica		~ 2 x 230V + T
Potencia eléctrica instalada	kW	4,5

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La caldera es de acero y está compuesta de:

- Cuerpo de acero: este elemento está constituido por un paso de humos verticales y un sistema mecánico de limpieza de humos, este ultimo puede ser accionado de forma manual o automática.
- Gran compartimento: su función es acumular las cenizas. La extracción de las mismas se realiza de forma manual, y opcionalmente con un sistema automático.
- Regulación electrónica: dispone de un encendido automático y permite dos modalidades de trabajo.
 - ◆ Continuo (invierno): tras el encendido inicial, la caldera estará siempre encendida, manteniendo un pequeño rescoldo o “llama piloto” en estado de reposo.
 - ◆ Demanda (verano): la caldera se enciende y apaga según la demanda de la instalación.



Figura 28. Caldera invernadero 2

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Existen otros elementos además de la caldera, estos conforman el sistema de calefacción. Dichas partes son:

- Silo: se trata de un silo de tela flexible para interiores. Es de poliéster de alta resistencia con cubierta superior cerrada en calidad filtrante con boca para carga neumática.



Figura 29. Silo invernadero 2

Este tipo de tejido evita la condensación incluso en grandes fluctuaciones de temperatura.

- Transportador de material desde el silo a la caldera: se compone de un cajetín silo, un motor trifásico de 1,5 cv, tubo de tramo recto, accesorios de sujeción y una espiral.



Figura 30. Transportador

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Recogedor de cenizas: permite la recogida automática de cenizas producidas por la combustión del material. Se compone de un cajón de cenizas, un motor reductor y un tornillo sinfín que permite expulsar la ceniza de la caldera al cajón.



Figura 31. Recogedor cenizas

3.2 Cultivo

3.2.1 Cultivo durante ensayo calefactores

En los ensayos que se realizaron en el invierno de 2010/2011, los invernaderos se encontraban recién trasplantados, siendo usado un cultivo de calabacín (*Cucurbita pepo* L.) con fecha de trasplante 19/01/2011.

3.2.2 Cultivo durante ensayo calefacción mediante caldera biomasa

En los tres invernaderos se trasplanto un cultivo de ciclo largo de tomate injertado *Solanum lycopersicum* L Ventero sobre el patrón *Solanum lycopersicum* L. cv. Arnold, trasplantado el 24 de agosto de 2011.

Las líneas de cultivo quedan perpendiculares a las ventanas laterales, plantado sobre canalón de fibra de coco de 30×30 cm y una distancia entre canalones de 2 metros. La distancia entre plantas es de 0,5 metros.

Los tres invernaderos se gestionaron de igual modo, mismo seguimiento de cultivo y riego, igual tratamiento fitosanitario y mismos parámetros del controlador del clima.



Figura 32. Tomate Ventero, variedad usada en ensayo.

3.3 Sistemas de medición y control clima

3.3.1 Sensores del Clima

En el sector Este de cada invernadero y en el sector oeste de los invernaderos 1 y 2 se encuentra una caja de medición EKTRON II-C (Hortimax S.L., Almería, España), compuesta por un sensor de temperatura Pt100, un sensor de humedad capacitivo, un sensor de concentración de CO₂ mediante infrarrojos y un sensor de radiación solar Tube Solari (Hortimax S.L., Almería, España). Sus características vienen definidas en la Tabla 10.

Tabla 10. Características de los sensores de la caja de medición EKTRON II-C

Sensor	Tipo	Intervalo Medida	Precisión	Resolución
Temperatura	Pt100	-10 a 60°C	± 0,6°C	0,02°C
Humedad	Capacitivo	0 a 100 %	± 3 %	0,03 %
CO ₂	Infrarrojos	0 a 2.000 ppm	± 20 ppm	0,1 ppm
Radiación	Tube solari	0 a 1.330 W m ⁻²	± 10 %	15 kW

3.3.2 Estación Meteorológica

Además de los sensores del interior del invernadero existe una estación que mide las condiciones climáticas exteriores. La estación meteorológica II (Hortimax S.L., Almería, España) se encuentra situada justo al lado de la nave del controlador y se compone de una caja de medida BUTRON II (Hortimax S.L. Almería, España) con un sensor de temperatura Pt100 y un sensor de humedad capacitivo. Un sensor de velocidad y dirección del viento Hortimax Anemometer (Hortimax S.L., Almería, España) con un anemómetro de cazoletas y una veleta. Un sensor de radiación solar Kipp Solari y un sensor de detección de lluvia tipo ON/OFF.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

El controlador de clima almacena de forma continua los datos climáticos de la estación meteorológica fija a 10 mm de altura y de los sensores situados en los invernaderos durante los 365 días del año y una frecuencia de 1 minuto.

Tabla 11. Características de los sensores de la estación meteorológica

Sensor	Tipo	Intervalo Medida	Precisión	Resolución
Temperatura	Pt1000	-25 a 75°C	±0,01°C	0,01°C
Humedad	Capacitivo	0 a 100 %	±2%(de 0 a 90%) ±3% /de 90 a 100%)	0,03 %
Velocidad Viento	Anemómetro de cazoletas	0 a 40 m s ⁻¹	± 5%	0,01 m s ⁻¹
Dirección Viento	Veleta WDIR	0-359°	± 5°	1°
Radiación	Piranómetro	0-2.000 W m ⁻²	±20 Wm ⁻² ó ± 2%	1 W m ⁻²
Lluvia	Conducción	ON-OFF		

3.3.3 Controlador Climático

Los controladores climáticos permiten regular las condiciones ambientales y posibilitan obtener mejores producciones en épocas desfavorables.

El control del clima de los invernaderos se realiza con el controlador Hortimax MultiMa (Hortimax S.L., El Ejido, Almería). Se encuentra instalado en la nave situada en la esquina Noreste del invernadero 2, y dicho controlador gobierna los actuadores climáticos de los tres invernaderos de forma simultánea. El controlador es el encargado de recoger y almacenar los datos medidos por la estación meteorológica y las cinco cajas de medida EKTRON II-C, analizar los datos y ajusta las salidas hacia los actuadores en función de las condiciones climáticas interiores y exteriores. Estos ajustes permiten gobernar el grado de apertura de las ventanas, la posición de la malla de sombreo y, activación de los sistemas de refrigeración y calefacción.

3.3.3.1 Consignas

Las consignas representan un valor de temperatura previamente establecido. Cuando la temperatura en el interior del invernadero llega al valor de la consigna, el sistema de control del clima se activa para mejorar las condiciones climáticas.

3.3.3.1.1 Consignas Sistema calefacción invernadero 1

Este invernadero se divide en dos sectores independientes, cada uno con sus sistemas de medición del clima.

Los calefactores de este invernadero se encontraban activos, listos para funcionar cuando las condiciones climáticas del interior del invernadero lo requirieran. Para ambos sectores se estableció como temperatura mínima para activar la calefacción, 8°C durante la noche y 5°C por el día. Una vez elevada la temperatura del microclima interna por encima de estos umbrales, los calefactores dejan de aportar calor al invernadero hasta que vuelve a descender la temperatura por debajo del valor de consigna.

3.3.3.1.2 Consignas Sistema calefacción invernadero 2

En el invernadero 2 se mantuvo encendida la caldera, se estableció una temperatura mínima de la caldera, que permitió activar la combustión de material siempre y cuando la temperatura interna de la caldera descendiera por debajo del valor establecido. Estos valores se fijaron en 60-70°C durante la noche y 30-40°C durante el día. La finalidad de mantener la caldera dentro de un intervalo de temperatura es permitir aportar calor al sistema de tuberías del invernadero cuando este lo requiera.

Como hemos visto anteriormente, cada sector del invernadero posee su caja de medición de temperatura, por lo que la calefacción funciona de manera independiente para cada sector.

La recirculación de agua por los ramales del invernadero se activará cuando la temperatura interior descienda de 8°C durante la noche y 5°C por el día, cediendo al invernadero el calor necesario para el mantenimiento del cultivo.

3.4 Medida de velocidad aire por anemometría sónica

Todos los anemómetros sónicos miden la velocidad del aire a partir del mismo principio de funcionamiento. Se basa en medir la influencia de dicha magnitud en el tiempo de transmisión de pulsos ultrasónicos entre dos parejas transmisor-receptor. Un par de transductores enfrentados forman una senda de medida que es capaz de determinar el módulo y el sentido de la velocidad del fluido en la dirección que forman los extremos de la senda.

Inicialmente se requería una pareja formada por un transmisor y receptor para cada senda de medida pero se han sustituido por modelos que usan para cada senda de medida dos sensores que pueden actuar como transmisor y receptor.

El proceso de medida consiste en que cada transmisor emite una señal de ultrasonido que viaja hacia el transmisor opuesto. La velocidad de propagación de ambas señales es la suma vectorial de la velocidad del sonido en el fluido, c , y de la velocidad del fluido en el entorno de la senda. Por lo tanto, la velocidad del fluido tiene un efecto diferente sobre la transmisión de ambas señales modificando los tiempos de viaje con respecto a la situación en que el fluido está en reposo.

A partir de la medición de las diferencias en los tiempos de propagación es posible determinar la componente del vector velocidad a lo largo de la dirección de la senda.

Las señales que emiten los transmisores pueden ser mediante pulsos o señales continuas. Además existen diversos métodos para la determinación de los tiempos de viaje de ambas señales y según el que se utilice se aplica un algoritmo diferente para el cálculo de la velocidad.

3.4.1 Anemómetro sónico tri-dimensional

Los 2 anemómetros tri-dimensionales utilizados son el modelo CSAT3 de Campbell Scientific Spain S.L. (Barcelona, España).



Figura 33. Anemómetro tri-dimensional. Imagen extraída de www.technosolutions.cn

Este anemómetro mide la velocidad del aire en un campo vertical de 10 cm. Para obtener dicha velocidad, mide las tres componentes ortogonales de la velocidad del aire (u_x , u_y y u_z) y la temperatura del aire (T_s) a una frecuencia máxima de 60 Hz.

Las características de los anemómetros sónicos tri-dimensionales son las siguientes.

Tabla 12. Características anemómetros tri-dimensionales

Sensor	Registro	Frecuencia registro	Intervalo medida	Precisión	Resolución
CSAT3	u_x , u_y , u_z T_s	10 Hz	0 a 30 ms^{-1} 0 a 30 ms^{-1} -30 a 50°C	$\pm 0,04 \text{ ms}^{-1}$ $\pm 0,02 \text{ ms}^{-1}$ $\pm 0,026 \text{ ms}^{-1}$	0,001 ms^{-1} 0,0005 ms^{-1} 0,002°C
windsonic	u_x , u_y dirección (Θ)	1 Hz	0 a 60 ms^{-1} 0 a 359°	$\pm 2\%$ $\pm 3^\circ$	0,01 ms^{-1} 1°

3.4.2 Anemómetro sónico bi-dimensional

El modelo de anemómetro bidimensional empleado es modelo windsonic de Gill Instrument LTD (Lymington, Hampshire, Reino Unido). Estos anemómetros miden la velocidad del aire en un campo vertical de 10 cm, a través de dos componentes ortogonales de la velocidad del aire. La frecuencia fijada para el registro de los valores fue de 1 Hz.



Figura 34. Anemómetro bi-dimensional.
Imagen extraída de www.campbellsci.com

3.5 Sistema de recogida de datos

3.5.1 Micrologger

Las medidas tomadas por los anemómetros tri-dimensionales y bi-dimensionales son guardadas en 2 equipos Micrologger CR3000. Cada uno de esos equipos puede conectar un anemómetro tridimensional CSAT3 y cinco anemómetros sónicos bidimensionales Windsonic.

Los micrologger registran y almacenan los sensores en dos tablas independientes. La primera con valores de u_x , u_y , u_z y T_s , para una frecuencia de 10 Hz. Y una segunda tabla para valores u_x , u_y , u_z y T_s del otro anemómetro tridimensional y los valores u_x y u_y de los cinco anemómetros bidimensionales, todo a una frecuencia de 1 Hz. Estos dispositivos micrologger tienen una capacidad de almacenamiento de 1 Gb.

3.6 Principios de la termografía

La termografía es la ciencia que permite obtener la temperatura de un cuerpo a través de imágenes. Esta ciencia se basa en captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético usando cámaras termográficas. También es necesario conocer los datos de humedad y temperatura del aire, distancia al objeto medido, temperatura reflejada y emisividad del objeto a medir.

La radiación registrada por la cámara consiste en la radiación de onda larga emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara.

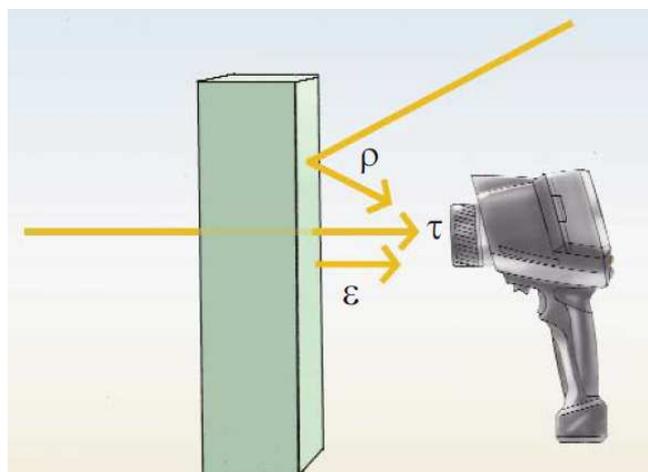


Figura 36. Radiación cámara infrarroja

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Emisividad (ϵ)

Es la medida de la capacidad de un material de emitir radiación infrarroja. La emisividad varía según las propiedades de la superficie, el material y, la temperatura del objeto medido. El valor máximo de emisividad es 1 ($\epsilon=1$) pero en realidad nunca se da, ya que la emisividad de los cuerpos reales es menor que 1 ($\epsilon<1$).

La emisividad de un objeto se expresa como el cociente entre la radiación emitida por un objeto a una temperatura T y la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura T.

Tabla 13. Valores de emisividad

Material	Emisividad
Acero brillante	0,18
Acero oxidado	0,85
Latón brillante	0,10
Latón oxidado	0,61
Aluminio brillante	0,05
Aluminio oxidado	0,30
Cemento	0,90
Asfalto	0,90
Ladrillo Rojo	0,93
Grafito	0,85
Cloth	0,85

- Reflexión (ρ)

Es la medida de la capacidad de un material de emitir radiación infrarroja. La reflexión es la medida de la capacidad de un cuerpo de reflejar la radiación infrarroja.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Transmisión (τ)

Se trata de la medida de la capacidad de un material de transmitir (permitir el paso) de la radiación infrarroja.

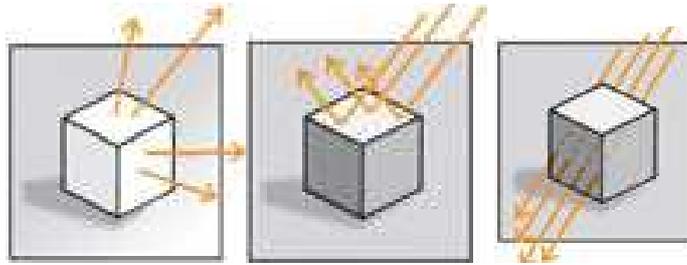


Figura 37. Emisividad, Reflexión y Transmisión

- Ley de radiación de Kirchhoff's

La radiación infrarroja registrada por la cámara termográfica consiste en:

- Radiación emitida por el objeto
- Reflexión de la radiación ambiente
- Transmisión de radiación del objeto medido

El resultado de la suma de estos factores es siempre 1.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

Debido a que en la práctica la transmisión juega un papel inapreciable, la variable τ se omite, quedando:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (2)$$

3.7 Cámara Termográfica

Toda cámara termográfica tiene la misma función, registrar la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y convertirla en una imagen visible.

La energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un deflector de infrarrojos (C). El deflector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen, y el sensor transforma los datos en una imagen (E) que puede visualizarse en un monitor estándar, pantalla LCD...

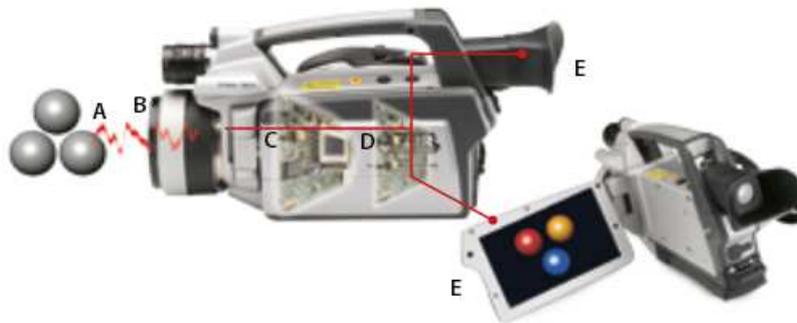


Figura 35. Funcionamiento cámara termografica

3.7.1 Fundamentos Cámara Termografica

La radiación que recibe la cámara termográfica proviene de tres fuentes de energía (Lamprecht *et al.*, 2.002): la radiación del objeto observado, la radiación de otros objetos reflejada en la superficie del objeto y la contribución de la atmósfera:

$$R_T = \varepsilon \sigma_{SB} T^4 + (1 - \varepsilon) \sigma_{SB} T_{refl}^4 + (1 - \tau) \sigma_{SB} T_a^4 \quad (3)$$

donde:

R_T [$W m^{-2}$]: la radiación total recibida por la cámara para longitudes de onda dentro del intervalo 7,3–13 μm (cámara fija) o 8–14 μm (cámara de mano)

ε : la emisividad del objeto (igual a 1 para un emisor perfecto o cuerpo negro)

$(1-\varepsilon)$: reflectividad del objeto

τ : transmisividad de la atmósfera

T : temperatura del objeto

T_{refl} : temperatura de los objetos

T_a : temperatura del aire (K)

Los estudios realizados por Sutherland y Bartholic, (1.979), Amiro *et al.*(1.983), Hippias (1.989) y Svendsen *et al.* (1.990) afirman que la ecuación (6) indica las dos principales fuentes de error en la medida de la radiación emitida por un cuerpo, el error derivado del valor de emisividad que se utilice y la radiación que es emitida por el entorno del objeto y reflejada en éste.

El análisis de las imágenes termográficas requiere de algunos parámetros para corregir los valores de temperatura de la imagen. Estos parámetros son la distancia del objeto (3 m para la cámara fija y 1 m para la cámara de mano), temperatura y humedad del aire (valores obtenidos de las cajas de medida EKTRON II-C del controlador climático) y la temperatura reflejada. Además, es necesario seleccionar el valor de emisividad correcto para el objeto cuya temperatura queramos medir con las cámaras termográficas.

3.7.2 Cámara termografica compacta

Se trata de una cámara compacta ThermoVision™ A40-M (FLIR Systems AB, Danderyd, Sweden), con un intervalo espectral de 7,3-13 μm , intervalo de medida de temperatura de -40 a 120°C, una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$ de la lectura para un intervalo de temperaturas entre 5 y 45°C y una sensibilidad térmica de 80 mK a 25°C.

La cámara termografica puede funcionar de forma autónoma pero permite almacenar un número muy limitado de imágenes, debido a esta escasa memoria puede conectarse a una fuente de almacenamiento. Para aumentar dicha capacidad y poder registrar imágenes a una frecuencia de captura pequeña (varios segundos) durante largos periodos de tiempo, se conecta la cámara a un ordenador a través de una conexión FireWire. Para programar la cámara, se usa el software ThermoCAM™ Researcher (FLIR Systems AB, Danderyd, Sweden).



Figura 38. Camara termografica compacta

3.7.3 Cámara Termografica de mano

La cámara de mano empleada corresponde al modelo SAT HotFind (SAT Infrared Technology Co. LTD, Guangzhou, China). Dicha cámara posee un intervalo espectral de 8 a 14 μm , rangos de temperatura de -20°C a 250°C y de -40°C a 70°C , una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ó $\pm 2\%$ de la lectura y una sensibilidad térmica de 80 mK a 30°C .

Muestra una pantalla LCD de 2.5" que permite capturar y almacenar imágenes térmicas en la memoria para ser transferidas de forma diferida después de haber realizado las distintas capturas.



Figura 39. Cámara termografica de mano

3.8 Métodos de cálculo

En este apartado se detallan los cálculos realizados para caracterizar el flujo de aire medido con los anemómetros bidimensionales y tridimensionales, partiendo de los datos almacenados.

3.8.1 Eliminación de picos

A lo largo de los ensayos, las medidas tomadas por los sensores se almacenan en series temporales. Estas pueden incluir distintas anomalías. Las más comunes han sido valores puntuales, con picos excesivamente elevados o bajos. Estos picos son valores muy alejados del valor medio obtenido para cada periodo. Si consideramos una serie temporal digitalizada $\{x_i\}$ que se comporta como una variable aleatoria normal en periodos cortos, podemos calcular su valor medio a través de:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Donde n es el número de valores registrados durante el periodo medido. La varianza es igual a:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Se fija el nivel de confianza de 3 veces la desviación típica σ , sustituyendo todos los valores que se encuentran fuera del intervalo $((\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma))$.

3.8.2 Velocidad del flujo de aire

Para la velocidad del aire u [m s^{-1}], así como para sus tres componentes ortogonales (longitudinal u_x , transversal u_y y vertical u_z ; Fig. 21) se puede definir el valor medio para un determinado intervalo de tiempo Δt [s] como (Cebeci, 2004):

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u dt \quad (6)$$

El intervalo de tiempo Δt debe ser lo bastante grande para que sea mayor que el periodo de cualquier fluctuación significativa y lo bastante corto para que los efectos transitorios en tiempo «real» no afecten a la integración, por lo que su valor se estableció en al menos 3 minutos (Chung, 2002). Este intervalo de tiempo es un compromiso entre un valor bajo que pueda dar lugar a errores por no muestrear la información suficiente de la velocidad del aire y un valor alto que pueda provocar una duración excesiva de los ensayos, dando lugar a importantes diferencias globales entre las condiciones climáticas exteriores al inicio y final de los ensayos (Molina-Aiz *et al.*, 2009).

3.9 Ensayos experimentales

Los ensayos realizados persiguen los siguientes objetivos:

- Análisis del microclima y del flujo de aire en invernaderos mediterráneos con calefacción mediante calefactores.
- Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos con calefacción a través de tuberías con agua caliente.
- Análisis del clima durante el periodo otoño-invierno de 2.011/2.012.

3.9.1 Análisis del microclima del invernadero 1

En el invernadero 1 López *et al.*, 2012 realizó un estudio para caracterizar el flujo de aire en el interior del mismo. En este periodo los invernaderos se encontraban recién trasplantados con un cultivo de calabacín (*Cucurbita pepo* L.) Durante el ensayo, el sistema de calefacción de dicho invernadero (calefactores) se encontraba activo.

La temperatura del cultivo (recién trasplantado) se midió con una cámara termográfica, mientras que la temperatura y humedad relativa del aire se registró con la caja de medida del controlador climático. La velocidad del aire en el interior del invernadero fue medida con anemómetros tridimensionales y bidimensionales.

Para colocar los anemómetros en el interior del invernadero se usó la estructura del alambre que constituye el emparrillado de sujeción del tutorado del cultivo. Los anemómetros se fijan a un brazo metálico que a su vez van unidos a una barra de aluminio.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

En uno de los extremos de la barra se colocan perfiles en forma de U que actúan como enganches para colocar la barra en los alambres del emparrillado, permitiendo modificar la altura de los anemómetros.

En el otro extremo se introduce otra barra pero de menor diámetro que sirve de anclaje para fijar el sistema al suelo.



Figura 40. Dispositivos de medida utilizados durante los ensayos

3.9.1.1 Diseño experimental

La figura 41 muestra la disposición de los puntos de colocación de los anemómetros:

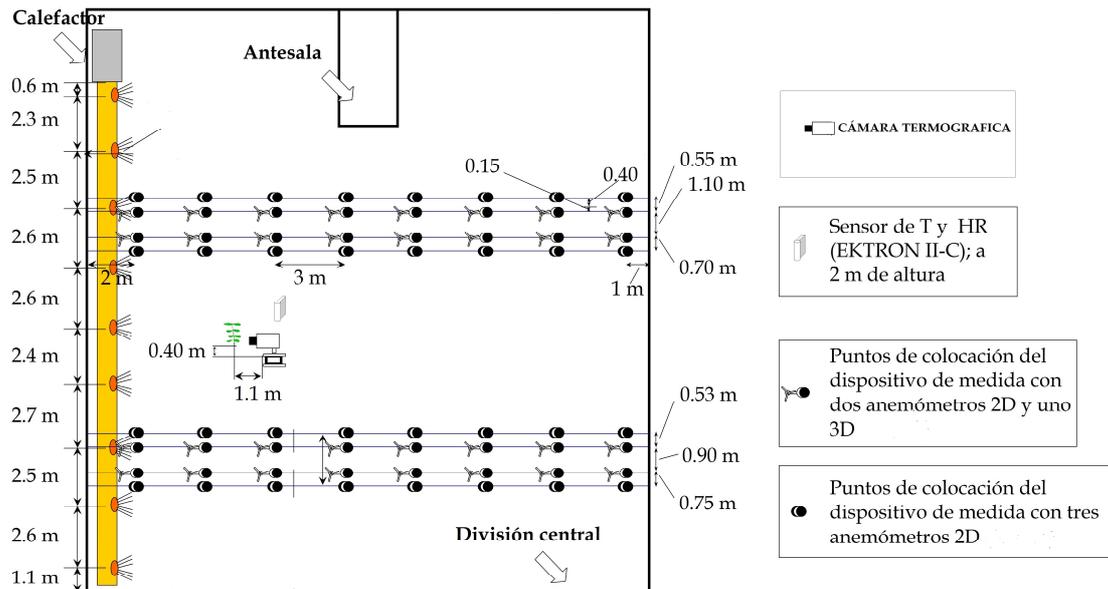


Figura 41. Localización de anemómetros

Para obtener la velocidad del aire en el interior del invernadero se analizaron 56 localizaciones. En cada localización se midió la velocidad del aire para tres alturas, resultando 168 puntos. Todas las medidas se realizaron entre las líneas de cultivo, siendo el tiempo de medición de 3 minutos. Los ensayos duraron en torno a 2-3 horas, por lo que el volumen de datos fue muy grande.

Las medidas en el interior se realizan colocando dos anemómetros 2D y un 3D en el mismo dispositivo de medida. Quedando el primer anemómetro 2D a un 1 m del suelo, otro a 2,5 m, y entre ambos, un anemómetro 3D a 1,75 m de altura.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Todos los datos medidos con los anemómetros sónicos, tanto bidimensionales como tridimensionales, fueron tratados con Matlab 7.0.

La temperatura del cultivo se midió con una cámara termográfica compacta ThermoVision™ A40-M (FLIR Systems AB, Danderyd, Sweden). Para calcular la temperatura fue necesario determinar la emisividad del haz de las hojas de calabacín (cucúrbita pepo L.), para el intervalo espectral de la cámara usada. El valor de emisividad usado fue de 0,985, valor determinado por López *et al.*, 2012.

Una vez concluidos los ensayos y con los datos obtenidos se analizó el patrón del flujo de aire en el interior del invernadero, el microclima interior y la distribución de temperatura interior.

3.9.2 Análisis del microclima invernadero 2

Con la finalidad de analizar el clima generado por el sistema de calefacción mediante tuberías dentro del invernadero 2, se realizó un ensayo a lo largo del periodo otoño-invierno 2012-2013.

Para la realización del mismo, fue necesario que el sistema de calefacción estuviera funcionando. El sistema de calefacción instalado en este invernadero cede calor al invernadero cuando la temperatura desciende por debajo de un valor previamente establecido. Por este motivo fue necesario realizar el ensayo a primera hora de la mañana, antes de que el sistema dejara de demandar calor para incrementar la temperatura del invernadero.

3.9.2.1 Diseño experimental

Para la realización de este ensayo se utilizaron las cámaras termográficas anteriormente descritas en los apartados 3.7.2 y 3.7.3.

La cámara compacta se colocó fija durante la realización del ensayo, ubicándose en el quinto ramal y enfocando la tubería principal, que distribuye el agua caliente a los 24 ramales que pasan alrededor de las diferentes líneas de cultivo. La frecuencia de muestreo de imágenes se fijó en una imagen cada 10 segundos (0,1 Hz).

Para las tuberías de agua caliente, que estaban pintadas en color blanco, se ha seleccionado un valor de emisividad de 0,93 (manual cámara termográfica, Flir, 2.006). La emisividad de las hojas del cultivo de tomate se han determinado siguiendo el método de “la emisividad de referencia” descrito por Fuchs y Tanner (1.966) y Rahkonen y Jokela (2.003), obteniéndose un valor de $0,980 \pm 0,010$ para el haz y de $0,981 \pm 0,009$ para el envés de las hojas de tomate, *Lycopersicon esculentum* Mill (López *et al.*, 2.012), seleccionando en este trabajo una emisividad de 0,98 para las medidas realizadas sobre el cultivo. Se optó por seleccionar la emisividad del haz de las hojas debido a que es el lado de las hojas que queda orientado en mayor medida hacia la cámara termográfica.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Sobre la tubería principal fotografiada por la cámara termografica fija se colocó una tabla de madera cubierta de papel de aluminio y, cinta aislante negra en algunos tramos de las tuberías. Con el papel de aluminio se calculó la temperatura reflejada y con la cinta aislante se pretendió calcular la emisividad de las tuberías pero los resultados no fueron buenos. La cinta aislante y las tuberías debían estar a la misma temperatura y posiblemente no fuese así por el efecto de la radiación solar, por las diferentes propiedades físicas o por los diferentes comportamientos térmicos de ambos materiales.

Con la cámara termografica de mano se tomaron fotos en 12 de los 24 ramales de tuberías que constituyen el sistema de calefacción del invernadero (en 7 puntos por ramal) y en las plantas que hay junto a cada uno de los 12 ramales (en 2 puntos por ramal). Los ramales se encuentran rodeando las diferentes líneas de cultivo, cediéndoles el calor aportado por el sistema de calefacción.



Figuras 42, 43, 44 y 45. Dispositivos usados invernadero 2

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

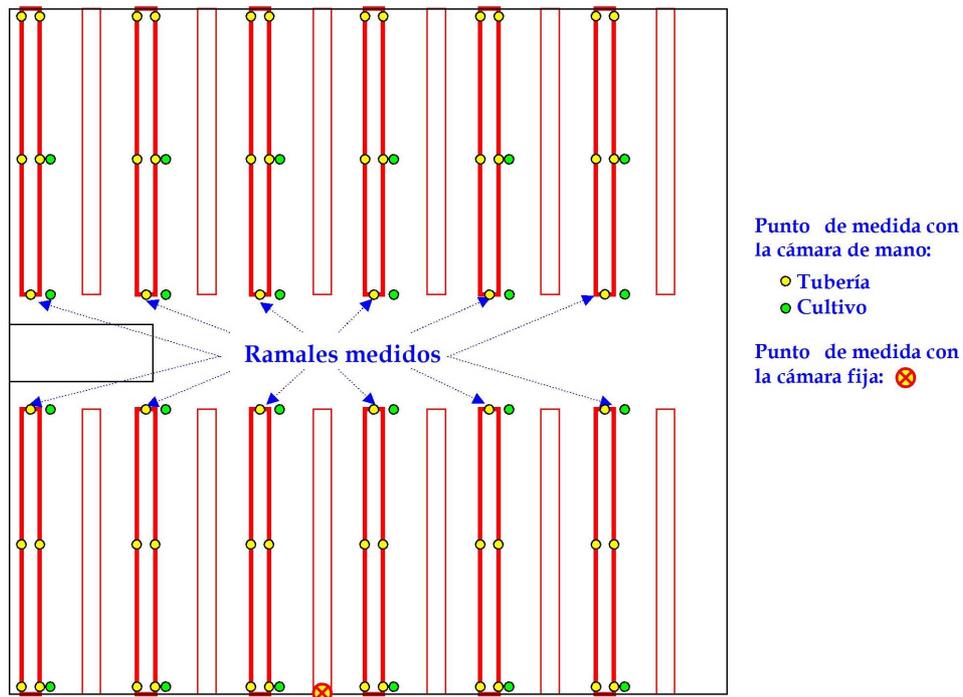


Figura 46. Puntos medida cámaras termograficas

La duración del ensayo fue de una hora aproximadamente, tiempo empleado en realizar todas las fotos con la cámara de mano. Una vez tomadas las fotos con la cámara de mano, podemos parar la cámara fija.

Debido a que las condiciones climáticas y el régimen de funcionamiento de la caldera varían a lo largo del ensayo, se hace necesario corregir la temperatura de la tubería en cada una de las imágenes tomadas con la cámara de mano. Para esta corrección se usa la siguiente expresión:

$$T_{tub-man0,j}^c = T_{tub-man0,j} \frac{T_{tub-fija}}{T_{tub-fija,j}} \quad (7)$$

$T_{tub-man0}^c$: temperatura corregida tubería medida cámara de mano

$T_{tub-man0,j}$: temperatura tubería cámara mano, en un tiempo j

$T_{tub-fija}$: temperatura tubería media medido cámara fija

$T_{tub-fija,j}$: temperatura tubería medido con cámara fija, en un tiempo j

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Si la fracción que multiplica a $T_{tub-mano,j}$ es superior a 1 significa que la temperatura en el punto j se midió en un momento con el sistema de tuberías a menor temperatura que la media del ensayo, por lo que se pondera $T_{tub-mano,j}$ multiplicándola por un número mayor que 1. Si dicha fracción es inferior a 1 significa que la temperatura en el punto j se midió en un momento con el sistema de tuberías a mayor temperatura que la media del ensayo, por lo que se pondera $T_{tub-mano,j}$ multiplicándola por un número menor que 1. De este modo se obtiene la distribución de temperatura por la red de tuberías.

Almacenadas todas las imágenes, se pasó a calcular la temperatura de las tuberías y cultivo en las distintas imágenes. Se usaron software específicos para cada cámara, el elegido para la cámara compacta fue ThermaCAMTM Researcher (FLIR Systems AB, Danderyd, Sweden), mientras que para la cámara de mano se optó por el programa SatReport 2.003.

3.9.2.2 ThermaCAM™ Researcher

El software dispone de herramientas de análisis como son: área, perfil, puntos, isothermas... Los datos obtenidos se pueden mostrar en imágenes IR (infrarrojas) y distintas pestañas: tablas de resultados, perfil térmico, histograma, gráfico temporal o vista simple.

En la figura 47 observamos la imagen IR, formada mediante una escala de colores, cada uno asociado a una temperatura. El blanco corresponde a la máxima temperatura de la imagen y el negro a la mínima. A partir de la IR se procedió a calcular el valor medio de la temperatura de la tubería.

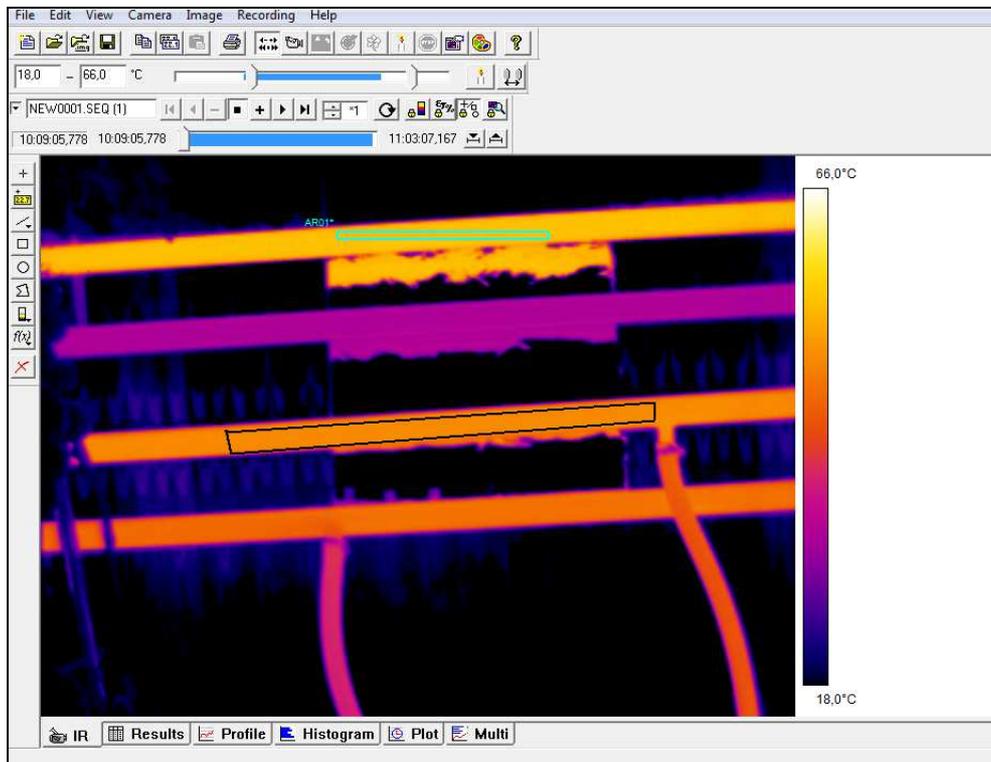


Figura 47. Imagen IR en programa ThermaCAM

Inicialmente se introdujeron los valores de emisividad, distancia al objeto, temperatura y humedad relativa. Seguidamente utilizando un polígono, se selecciono el área de estudio y se estableció su valor de emisividad (emisividad tubería). Definidos los valores de dichos parámetros, pinchamos sobre la pestaña “Profile” y obtenemos los resultados de las distintas temperaturas (temperatura máxima, mínima, media, diferencia de temperatura...) en tablas y gráficos.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

3.9.2.3 SatReport 2003

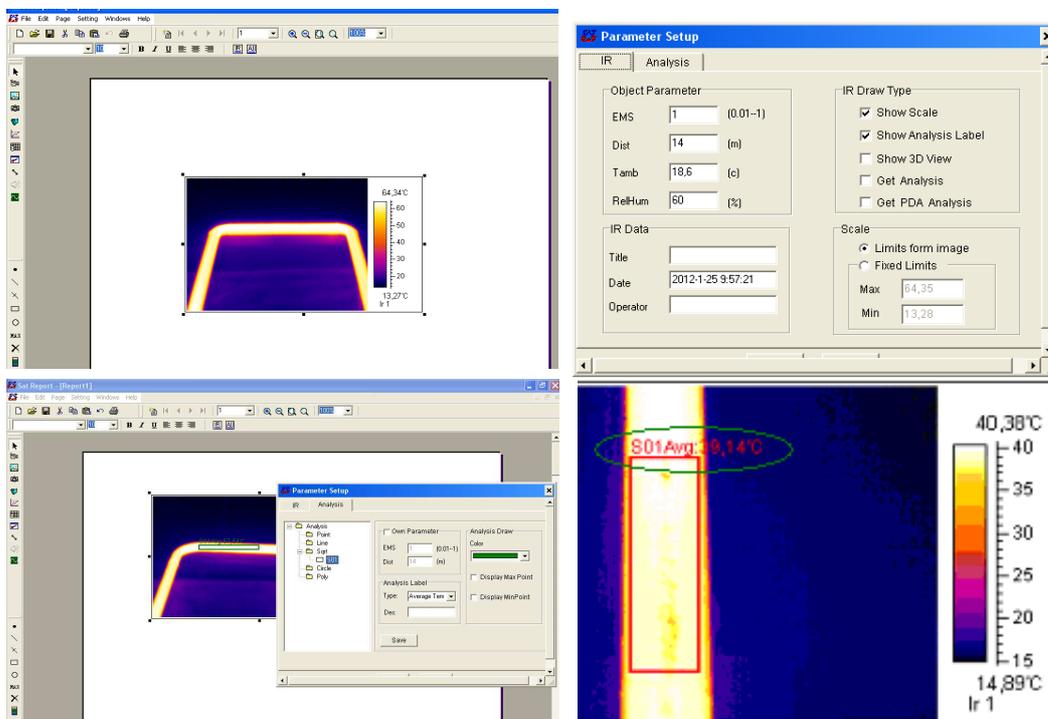
Para el tratamiento de las imágenes IR capturadas con la cámara de mano se usó un programa basado en el mismo funcionamiento que el descrito anteriormente.

Fue necesario introducir los parámetros de emisividad, distancia al objeto, temperatura y humedad relativa del aire.

Tras incorporar los parámetros para la IR, se marcó con un rectángulo el área sobre la cual queríamos conocer la temperatura (temperatura máxima, mínima o media), en nuestro caso se calculó la temperatura media.

Seguidamente pasamos a introducir los parámetros del área seleccionada (emisividad y distancia del objeto). Como muestra la siguiente imagen, tenemos una ventana nueva, en su parte izquierda aparecen las carpetas correspondientes a los diferentes autoformas que podemos usar para crear los polígonos (en nuestro caso un rectángulo), en la parte derecha superior se encuentran los valores que necesitamos introducir y en la derecha inferior, el parámetro a definir.

Tras completar la ventana, aparece sobre la imagen IR, el valor de la temperatura media del área seleccionada.



Figuras 48 y 49. Proceso obtención temperatura media

3.9.3 Análisis del clima durante el periodo otoño-invierno de 2011/2012.

El principal objetivo de este análisis es comparar el microclima generado en el interior de los tres invernaderos (invernadero con calefacción mediante calefactores, con caldera y sin calefacción).

Para conseguir dicho objetivo se utilizaron los datos obtenidos a través de los sensores de clima (3.3.1) instalados en cada invernadero (invernadero 1, 2 y 3) y la estación meteorológica (apartado 3.3.2) situada en el exterior.

Los sensores utilizados poseen una frecuencia de toma de datos de 1 minuto, por lo que fueron recogidos datos cada minuto a lo largo del periodo otoño-invierno.

Debido al gran número de datos almacenados se calcularon dichos parámetros para intervalos de tiempo de 5 minutos, y posteriormente para intervalos de 1 día. Estos datos (en intervalos de 1 día) son los que finalmente fueron estudiados.

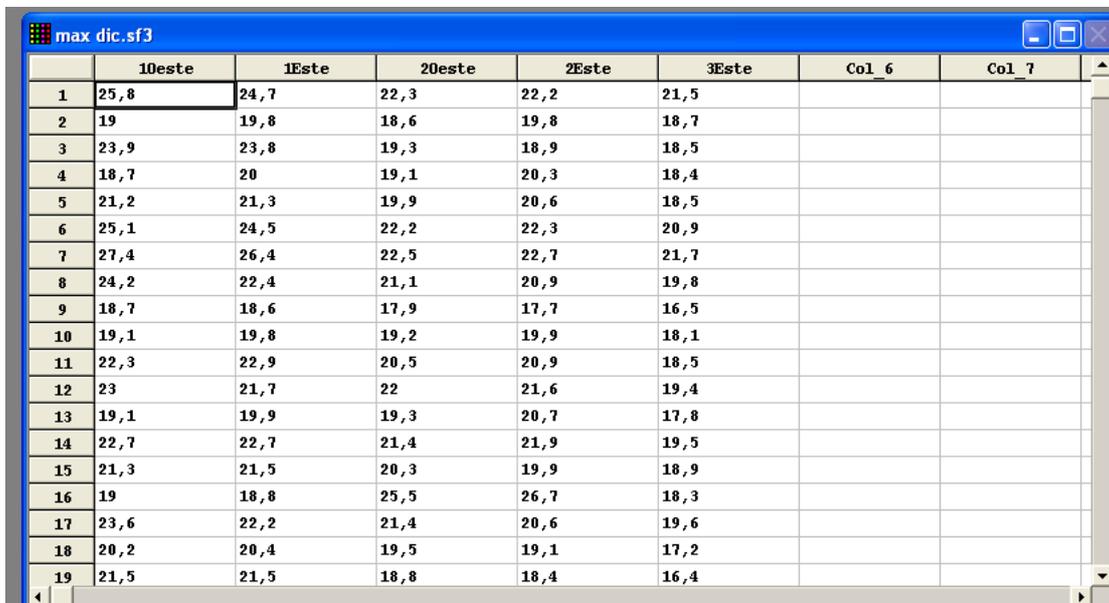
Para el análisis estadístico se ha usado el programa Statgraphics Plus versión 4.1., la determinación de las diferencias estadísticas entre variables se ha realizado a través de pruebas de rango múltiple “least significant difference LSD”, con un nivel de confianza del 95%.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

3.9.3.1 Statgraphics Plus 4

Se trata de un software diseñado para facilitar el análisis estadístico de datos, análisis descriptivos de una o varias variables, usando gráficos que expliquen su distribución o calculando sus medidas características.

Lo primero que se hace, es organizar los datos (recogerlos, clasificarlos, tabularlos). Statgraphics almacena los datos en variables que se guardan en hojas de datos. La información se define en forma matricial y cada columna de la matriz corresponde a una variable.



	10este	1Este	20este	2Este	3Este	Col_6	Col_7
1	25,8	24,7	22,3	22,2	21,5		
2	19	19,8	18,6	19,8	18,7		
3	23,9	23,8	19,3	18,9	18,5		
4	18,7	20	19,1	20,3	18,4		
5	21,2	21,3	19,9	20,6	18,5		
6	25,1	24,5	22,2	22,3	20,9		
7	27,4	26,4	22,5	22,7	21,7		
8	24,2	22,4	21,1	20,9	19,8		
9	18,7	18,6	17,9	17,7	16,5		
10	19,1	19,8	19,2	19,9	18,1		
11	22,3	22,9	20,5	20,9	18,5		
12	23	21,7	22	21,6	19,4		
13	19,1	19,9	19,3	20,7	17,8		
14	22,7	22,7	21,4	21,9	19,5		
15	21,3	21,5	20,3	19,9	18,9		
16	19	18,8	25,5	26,7	18,3		
17	23,6	22,2	21,4	20,6	19,6		
18	20,2	20,4	19,5	19,1	17,2		
19	21,5	21,5	18,8	18,4	16,4		

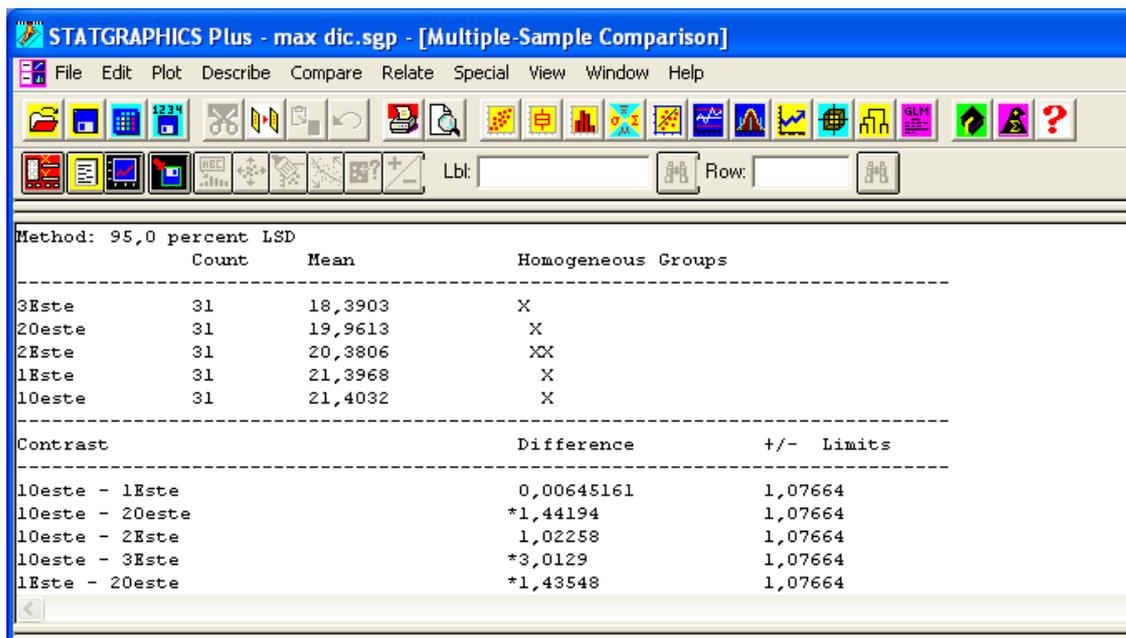
Figura 50. Tabla de datos del programa Statgraphics

Para determinar diferencias estadísticas entre variables se han realizado pruebas de rango múltiple aplicando el procedimiento de Fisher “*least significant difference LSD*”, iniciando el nivel de confianza en el 95%.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Antes de aplicar el procedimiento LSD debe realizarse la prueba de verificación de la varianza. Si dicha prueba sale positiva se puede realizar la prueba de rango múltiple, y si sale negativa, para indicar si existe diferencia estadística significativas hay que analizar los gráficos de cajas y bigotes.

Una vez realizada la prueba de rango múltiple a través del procedimiento LSD, obtenemos las tablas que muestran la figura 51.



Method: 95,0 percent LSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
3Este	31	18,3903	X
20este	31	19,9613	X
2Este	31	20,3806	XX
1Este	31	21,3968	X
10este	31	21,4032	X

Contrast	Difference	+/- Limits
10este - 1Este	0,00645161	1,07664
10este - 20este	*1,44194	1,07664
10este - 2Este	1,02258	1,07664
10este - 3Este	*3,0129	1,07664
1Este - 20este	*1,43548	1,07664

Figura 51. Grupo de datos con diferencias estadísticas

Los grupos homogéneos son aquellos que tienen alineadas la X, en este caso existen cuatro grupos homogéneos, y por lo tanto existen diferencias significativas.

4. Resultados

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

A continuación se reflejan los resultados alcanzados en este trabajo. En el apartado 4.1 recogemos los datos del microclima y del flujo de aire en el interior del invernadero 1, datos obtenidos a través del ensayo de anemómetros. El apartado 4.2 muestra los resultados de los ensayos aplicados en el invernadero 2. Finalmente en el apartado 4.3 se presenta el estudio del clima generado en el interior de los 3 invernaderos

4.1 Análisis del microclima generado en el invernadero 1

4.1.1 Condiciones climáticas exteriores

La siguiente tabla comprende las condiciones climáticas exteriores durante las dos horas aproximadas de duración de los ensayos

Tabla 14. Velocidad del viento [m s^{-1}]. θ , dirección del viento [$^{\circ}$]; RH_e , humedad relativa del aire exterior [%]; T_e , temperatura del aire exterior [$^{\circ}\text{C}$]. R_g , radiación solar [W m^{-2}]

Fecha	Ensayo	Velocidad Viento	Dirección Viento	RH	Temperatura exterior	Radiación Solar
10/02/2011	1	2,16±0,96	80±16	81±3	9,5±1,2	59±48
16/02/2011	2	1,47±0,57	301±25	46±4	10,5±0,6	6±12
18/02/2011	3	1,33±0,69	144±116	46±4	10,6±0,8	5±11

La temperatura mínima registrada durante las dos horas de duración de los ensayos, fue de $7,7^{\circ}\text{C}$ para el ensayo 1 y $9,3^{\circ}\text{C}$ para los ensayos 2 y 3. Bajo estas condiciones exteriores, el sistema de calefacción funcionaría de forma automática, ya que el controlador del sistema se programó para activar los calefactores cuando la temperatura interior bajase de 15°C .

Para el invernadero sin calefacción, el valor de temperatura mínima registrado durante los ensayos fue de $10,4^{\circ}\text{C}$, $9,2^{\circ}\text{C}$ y $10,0^{\circ}\text{C}$ para los ensayos 1, 2 y 3. Valores inferiores a la consigna de temperatura por debajo de la cual funcionan los calefactores.

Durante la realización de los ensayos se mantuvieron activos los calefactores para poder medir la velocidad del aire en todos los puntos establecidos en el interior del invernadero.

4.1.2 Flujo de aire interior

Tanto la velocidad del aire u como la proyección horizontal l fueron mayores en el nivel más bajo (altura 0,8 m) en comparación con los valores obtenidos a mayor altura. Esta diferencia se debe principalmente a la elevada velocidad del flujo de aire por los orificios de salida de la manga de distribución (valor medio de 23,4, 22,9 y 31,8 m s^{-1} para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente), lo que hace que la velocidad en los puntos más próximos a la manga sea mayor que en el resto.

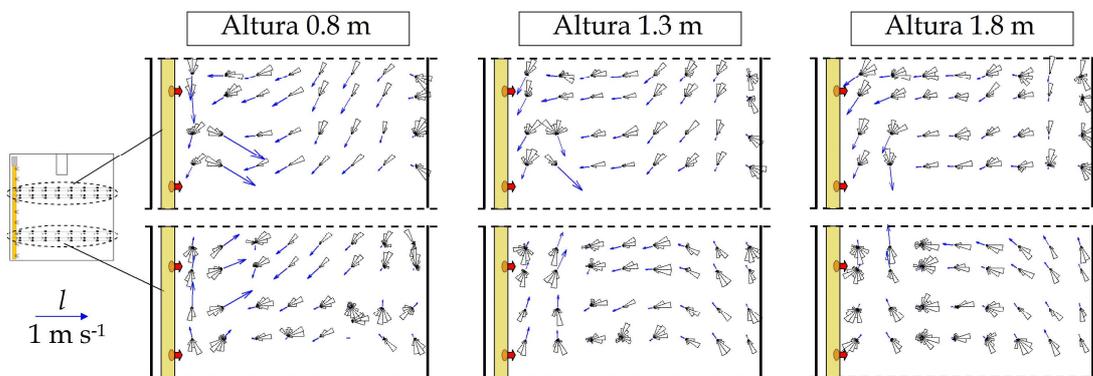


Figura 52. Proyección de la velocidad del aire en el plano horizontal XY e histogramas polares de frecuencia de la dirección del aire obtenidos para el ensayo 1.

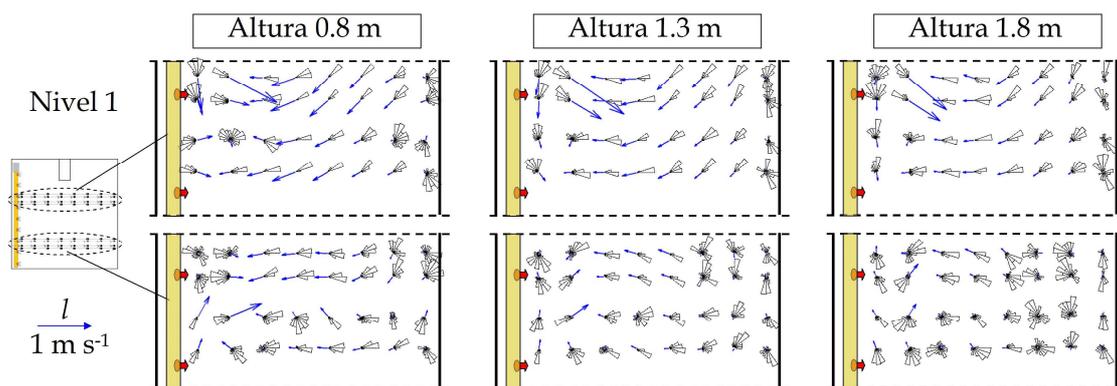


Figura 53. Proyección de la velocidad del aire en el plano horizontal XY e histogramas polares de frecuencia de la dirección del aire obtenidos para el ensayo 2.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La proyección vertical v obtenida nos indica que el aire caliente que sale por los orificios de la manga de distribución asciende a pocos metros de distancia de ésta. Los orificios de salida del aire quedaban orientados hacia el suelo, el flujo de aire caliente que sale de dichos orificios, impacta con el suelo para seguidamente ascender hacia la parte alta del invernadero. Este aire caliente se desplaza por encima del cultivo hacia el lateral sur del invernadero para descender a la zona del cultivo y volver hacia la manga de distribución (fig 54). Desde el tercer punto más próximo a la manga y hasta el extremo sur del invernadero, el flujo de aire se dirige hacia el lateral norte, en sentido opuesto al sentido que tiene el flujo de aire cuando sale por los orificios de la manga de distribución.

La malla aluminizada se utiliza para evitar que el aire caliente ascienda a la parte más alta del invernadero, pero la altura de la malla (4,75 m) no evita que el aire caliente se desplace por encima del cultivo.

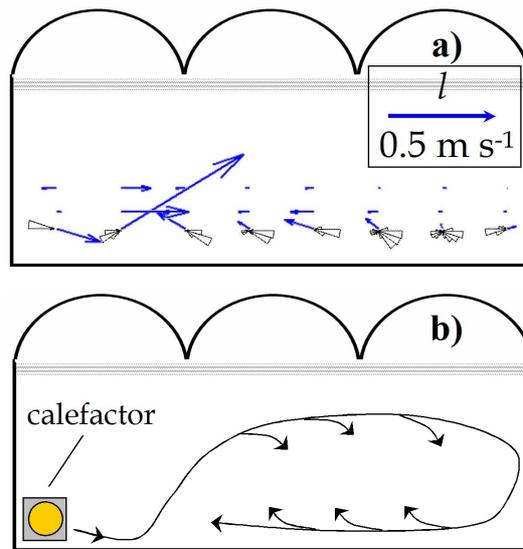


Figura 54a y 54b. Flujo aire en el interior invernadero

4.1.3 Microclima Interior

Los valores de temperatura de la tabla 15 fueron medidos en la parte baja del invernadero, analizado el flujo de aire en el interior se puede decir que la mayor parte del calor producido por los calefactores se desplaza y acumula en la parte alta del invernadero, aspecto que fue observado también por Tadj *et al.* (2.010).

El sistema de calefacción estudiado consigue mantener la temperatura media del invernadero durante el tiempo de duración de los ensayos 7,7, 8,8 y 7,3°C por encima de la temperatura observada en el invernadero sin calefacción, para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente.

La máxima diferencia de temperatura entre el interior del invernadero con calefacción y el exterior fue de 11,2°C en el ensayo 1, con un calefactor de 88 kW (146.67 W m⁻²), ligeramente superior a los 10,2°C observados por Perdignes *et al.*, (2.006) en un invernadero con calefactores de aire caliente.

Durante la realización de los 3 ensayos se consiguió elevar notablemente la temperatura del aire dentro del invernadero. Si lo comparamos con el invernadero 3, invernadero sin sistema de calefacción, observamos un aumento de al menos 7°C. Este hecho lleva consigo un cambio drástico en la diferencia de temperatura entre en el interior y exterior del invernadero, que permite un mejor desarrollo del cultivo en el invernadero 1 que en el 3.

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

El gran inconveniente que encontramos en el uso de los calefactores del invernadero 1 radica en las grandes diferencias entre la temperatura máxima y mínima dentro del invernadero.

Tabla 15. Condiciones climáticas interiores durante los ensayos para el estudio de los calefactores mediante anemometría y termografía. T_i , temperatura del aire interior [°C]; ΔT_{ie} , diferencia de temperatura entre el interior y el exterior [°C]; T_{sc}^c , temperatura sónica del aire corregida con el promedio de la temperatura entre el interior y el exterior. ΔT_{ie}^c , diferencia de temperatura entre el interior y el exterior calculada a partir de los valores de temperatura sónica corregida [°C]; ΔT_{sc-h} , gradiente de temperatura horizontal [°C]; $T_{max}-T_{min}$, diferencia de temperatura entre el punto más frío y el más caliente.

Ensayo	Invernadero	T_i	ΔT_{ie}	T_{sc}^c	ΔT_{ie}^c	ΔT_{sc-h}	$T_{max}-T_{min}$
1	1 (calefactado)	20,7±5,5	11,2	20,6±1,8	11,1±1,8	0,07	6,5
	3 (no calefactado)	12,9±2,7	3,4	-----	-----	-----	-----
2	1 (calefactado)	18,7±2,6	8,2	18,1±2,1	7,6±2,1	0,07	8,8
	3 (no calefactado)	9,9±0,6	-0,6	-----	-----	-----	-----
3	1 (calefactado)	18,2±2,9	7,6	17,8±2,2	7,2±2,2	0,07	8,3
	3 (no calefactado)	10,9±0,7	0	-----	-----	-----	-----

4.1.4 Distribución de temperatura interior

Para estudiar la distribución de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del aire ΔT_{ie} , a partir de las medidas de temperatura realizadas con los anemómetros 3D en el interior del invernadero, hay que tener en cuenta que las condiciones climáticas cambian durante los ensayos. Para solventarlo se puede utilizar la diferencia de temperatura de aire corregida ΔT_{ie}^c [°C] con el promedio de temperatura entre el interior y el exterior mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ie,j}^c (1) = T_{sc,j}^c - T_e = T_{sc,j} \frac{T_e + T_i}{T_{e,j} + T_{i,j}} - T_o \quad (8)$$

donde:

T_e : Temperatura exterior media

T_i : temperatura del aire interior media

$T_{sc,j}$: temperatura interior corregida

$\Delta T_{ie,j}$: gradiente de temperatura corregido

Si la fracción que multiplica es superior a 1 significa que la temperatura en el punto j se midió en un momento más frío que la media del ensayo, por lo que se pondera la temperatura multiplicándola por un número mayor que 1. Si dicha fracción es inferior a 1 significa que la temperatura en el punto j se midió en un momento más caliente que la media del ensayo, por lo que se pondera la temperatura multiplicándola por un número menor que 1.

Los siguientes mapas de temperatura (Figura 55 a, b y c) representan la distribución de temperaturas en el interior del invernadero correspondientes a una altura de 0,8 m para las medidas realizadas con los anemómetros sónicos 3D. Estos mapas de temperatura muestran una gran heterogeneidad, los valores máximos se alcanzan en los puntos situados a 5 m del lateral norte del invernadero, recordemos que los orificios de salida del aire quedaban orientados hacia el suelo.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

En el análisis anterior del flujo de aire se observó que el aire caliente, tras salir de la manga de distribución, asciende y se dirige hacia el lateral sur del invernadero por la parte alta del invernadero. Cuando el aire caliente llega al extremo sur del invernadero, y desciende hacia el suelo, su temperatura es muy inferior a los valores máximos observados.

Con este sistema de calefacción se han observado diferencias de temperatura entre el punto más caliente y el punto más frío de 6,5°C, 8,8°C y 8,3°C para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente. Curiosamente, los puntos de menor temperatura se han observado en la zona central del invernadero, y no en el extremo sur, como cabría esperar en principio.

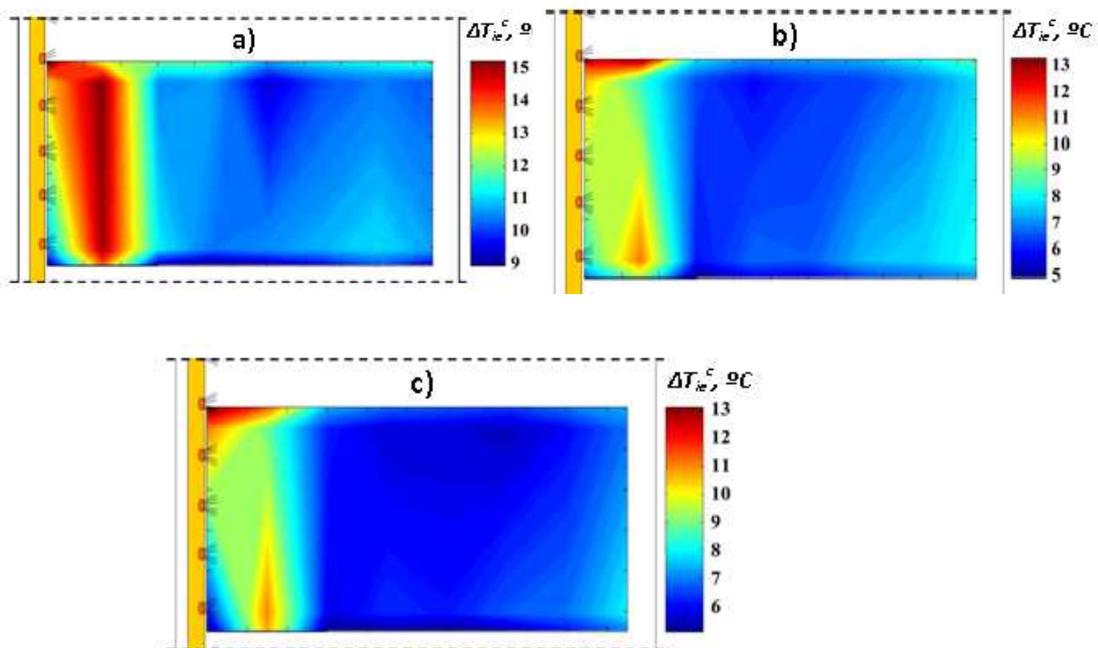


Figura 55. Diferencia de temperatura de aire corregida (ΔT_{ie}^c) en el interior del invernadero 1 (con calefacción). Ensayos 1 (a), 2 (b) y 3 (c)

Las especies hortícolas que se cultivan en la región del mediterráneo son hortalizas de exigencias técnicas medias (tomate, pimiento, pepino, melón, sandía, calabacín, judía verde, berenjena...). Estos cultivos son especies de estación cálida, adaptadas a temperaturas medias del aire entre 17 y 28°C, con límites de temperatura media diaria de 12°C (mínimas) y de 32°C (máximas) (Nisen *et al.*, 1.988). Von Zabeltitz (1.999) habla de temperaturas medias entre 17 y 27°C y límites mínimos y máximos de temperatura de 10 y 35°C. Estas especies suelen ser poco resistentes al frío, pudiendo sufrir daños irremediables frente a heladas. La persistencia de temperaturas inferiores a 10-12°C durante varios días puede afectar a su productividad (Nisen *et al.*, 1.988).

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La temperatura media del cultivo durante los tres ensayos se mantuvo por encima de 17°C. La temperatura del cultivo se midió aproximadamente a 7 m de distancia del lateral norte del invernadero. Debido a la gran heterogeneidad de temperatura dada en el interior del invernadero probablemente las plantas situadas en el sector sur del invernadero se encuentren a una temperatura bastante inferior.

En el caso de que la temperatura de las hojas llegue a ser inferior a la temperatura del aire se puede alcanzar el punto de rocío y producirse la condensación de agua en las hojas. Esta condensación, que generalmente se produce por la noche, es un problema importante en los invernaderos, ya que favorece la aparición de ciertas enfermedades relacionadas principalmente con el desarrollo de hongos fitopatógenos (Teitel *et al.*, 2.009).

Tabla 16. Temperatura del cultivo media durante los ensayos medida con una cámara termográfica compacta [°C].

Fecha	Ensayo	T _c	T _{Min}	T _{Max}
10/02/2011	1	19,9±3,7	13,7	26,1
16/02/2011	2	17,6±1,6	14,5	19,9
18/02/2011	3	18,1±2,1	14,2	21,3

Durante los ensayos el sistema de calefacción estuvo funcionando durante 2 horas. Analizando la evolución de la temperatura del aire media en el invernadero y fijada una temperatura consigna de calefacción en 18°C, el sistema de calefacción permite alcanzar la temperatura consigna en 50, 41 y 46 minutos, partiendo de una temperatura inicial de 11,8, 13,2 y 12,6°C para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente. Para los tres ensayos se obtiene que el sistema proporciona un aumento en la temperatura media del aire de 0,12°C min⁻¹. Este dato es fundamental conocerlo para poder programar el tiempo de funcionamiento del sistema en función de la temperatura inicial a la que se encuentre el invernadero y la temperatura que se quiera alcanzar.

4.1.5 Consumo de gasoil durante ensayos con anemómetros

El consumo de los calefactores se obtuvo de las lecturas directas realizadas sobre el depósito de gasoil ubicado junto al calefactor en el sector este del invernadero 1, y fue de 40 litros para los ensayos 1 y 2 y de 30 litros para el ensayo 3. El consumo teórico de los calefactores es de $8,3 \text{ kg h}^{-1}$, si la densidad del gasoil de $0,85 \text{ kg l}^{-1}$, el consumo teórico sería de $9,8 \text{ l h}^{-1}$.

Los ensayos duraron aproximadamente 2 horas, teniendo en cuenta que se activaron los dos calefactores del invernadero, el consumo real fue de aproximadamente 8,5, 10,0 y $8,0 \text{ l h}^{-1}$ para los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente.

Se ha utilizado a una malla aluminizada con un porcentaje de porosidad entre 50-54%, en el futuro se debe plantear utilizar mallas más tupidas o densas, ya que está demostrado que estas mallas ayudan a reducir el consumo de energía de los calefactores.

Este tipo de mallas pueden ayudar a reducir el consumo en sistemas de calefacción por tuberías de agua caliente entre un 17% durante el día y un 11% durante la noche (Amsen, 1.986), aunque este autor no indicase las características de la malla utilizada. Kittas *et al.* (2.003) estimaron que el ahorro energético en calefacción (en tuberías de agua caliente) podría llegar a ser del 15% en invierno con el uso de una malla aluminizada con el 65% de porosidad; además, con estas mallas se consigue un microclima interior más homogéneo e incrementa la temperatura media del cultivo (Teitel *et al.*, 2.009), y puede ayudar a reducir el gradiente vertical de temperatura y humedad.

4.2 Análisis del microclima del invernadero 2

Se realizaron un total de 5 ensayos para estudiar la distribución de la temperatura en el sistema de tuberías y en el cultivo. Fue necesario activar la caldera de forma manual y mantener activa la demanda de calor por parte del invernadero durante todo el tiempo que durasen los ensayos. Las condiciones meteorológicas exteriores durante cada ensayo quedan resumidas en la tabla 17.

Tabla 17. Condiciones climáticas exteriores durante los ensayos de estudio de la caldera mediante termografía. u_e , velocidad del viento [m s^{-1}]. θ , dirección del viento [$^\circ$]; RH_e , humedad relativa del aire exterior [%]; T_e , temperatura del aire exterior [$^\circ\text{C}$]. R_g , radiación solar [W m^{-2}].

Fecha	Ensayos	Hora	u_e	θ	RH_e	T_e	R_o
18-01-2012	1	9:09 – 10:03	3,68±0,42	81±8	Averitada	13,4±0,4	Averitada
25-01-2012	2	9:04 – 9:57	1,10±0,75	51±26	Averitada	11,3±0,9	Averitada
26-01-2012	3	9:30 – 10:38	0,64±0,32	117±41	Averitada	11,3±0,9	Averitada
27-01-2012	4	9:00 – 9:44	1,66±0,78	72±14	Averitada	9,8±0,4	Averitada
31-01-2012	5	9:00 – 9:44	0,24±0,12	352±2	Averitada	8,5±0,8	Averitada

4.2.1 Distribución de temperatura en las tuberías

Tras corregir la temperatura de la tubería tomada con la cámara de mano, se obtiene la distribución de temperatura por la red de tuberías (Fig. 56).

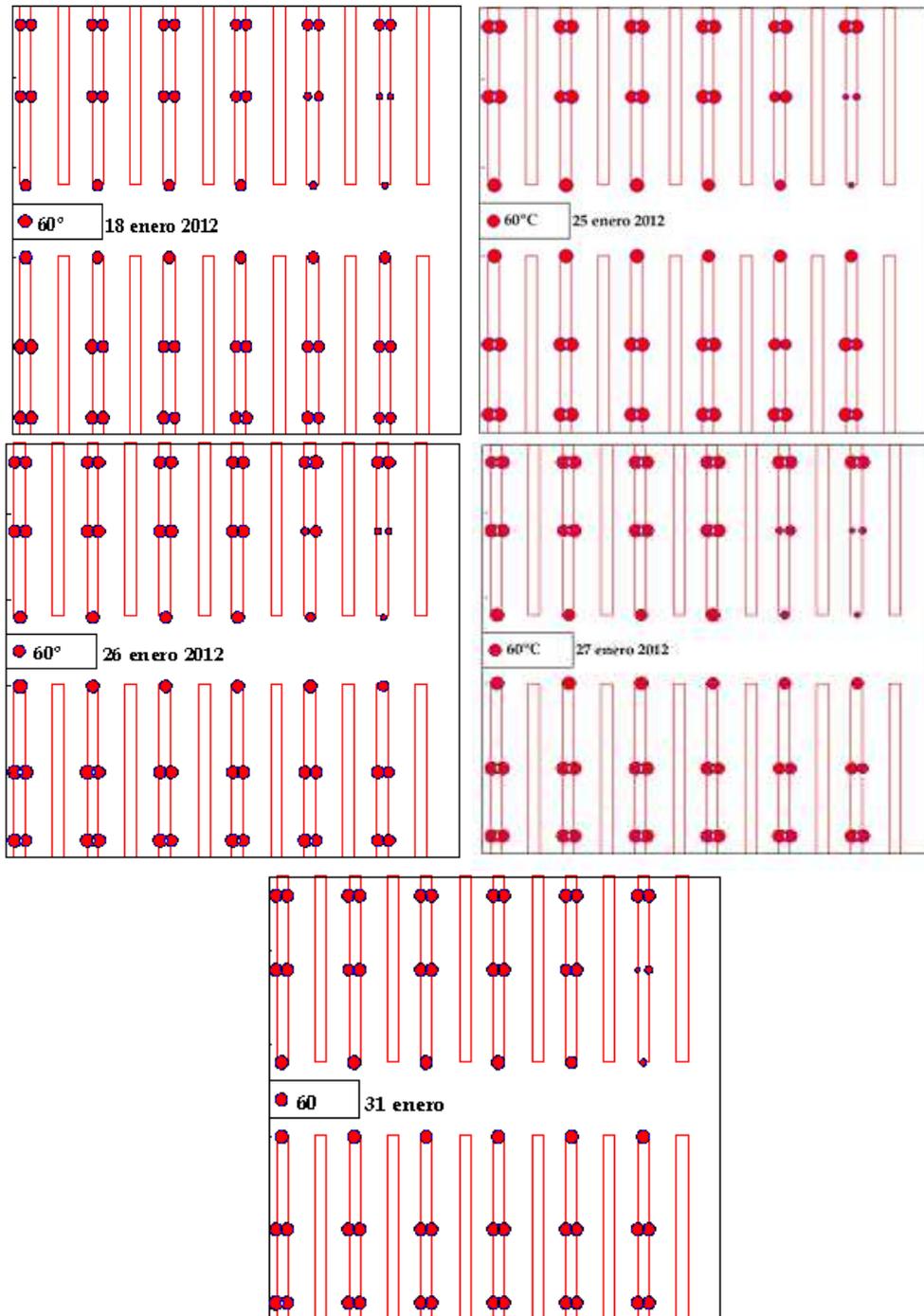


Figura 56. Temperatura tuberías invernadero 2 durante los ensayos

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Analizando la tabla 18 apreciamos que en 4 de los 5 días de ensayos, la temperatura media de las tuberías es similar mientras que para el 18 de enero desciende considerablemente. Las tuberías más calientes suelen coincidir en los 5 días de ensayo, situándose al inicio del ramal 1, mientras que los puntos más fríos se encuentran en el ramal 14 (ramal averiado). Despreciando el ramal averiado, el ramal más frío durante los cinco ensayos se encuentra en el ramal 16, en la zona pegada al pasillo central.

Tabla 18. Temp X tub: temperatura media tubería [°C], Temp Max tub: temperatura máxima tubería [°C], Temp Min tub: temperatura mínima tubería [°C] *Despreciando el ramal averiado.

	Temp X tub	Temp Max tub	Temp Min Tub
18-ene	43,03	52,95 (r1-1)	18,86 (r16-5)
25-ene	59,97	70,73 (r14-1)	38,8 (r16-5)
26-ene	53,73	64,50 (r1-1)	26,07 (r16-5)
27-ene	59,17	71,20 (r1-1)	25,72 (r16-5)
31-ene	54,54	63,22 (r1-1)	46,76 (r16-5)

En definitiva, la temperatura de todos los ramales se mantiene más o menos uniforme, excepto en el ramal medido en el extremo suroeste del invernadero (esquina superior derecha). Este ramal estuvo frío en todos los ensayos, lo que posiblemente se deba a un fallo o defecto en la instalación de las tuberías, quedando dicho ramal obturado.

Tras tratar estos resultados podemos confirmar que el uso de este sistema permite mantener una temperatura de tuberías uniforme en todo el invernadero pero es necesario mantener un control periódico con el fin de evitar que algunas tuberías queden obstruidas, provocando un descenso de su temperatura.

4.2.2 Distribución de temperatura en el cultivo

Para obtener la temperatura del cultivo se siguió el mismo procedimiento que para la temperatura de las tuberías. Se calculó la temperatura del cultivo en distintos puntos y posteriormente se trató de corregir dichos valores.

Aunque la temperatura del cultivo se midió con la cámara termográfica en distintos momentos para cada punto (1 hora de tiempo aproximado entre la toma del primer punto y del último punto), en este caso no se ha podido corregir la temperatura del cultivo para compensar el cambio de las condiciones microclimáticas durante los ensayos por no disponer de ningún valor de temperatura de referencia (se podría haber pensado en utilizar la temperatura del aire interior, pero no sería correcto).

La figura 57 representa la distribución de temperatura del cultivo dentro del invernadero 2.

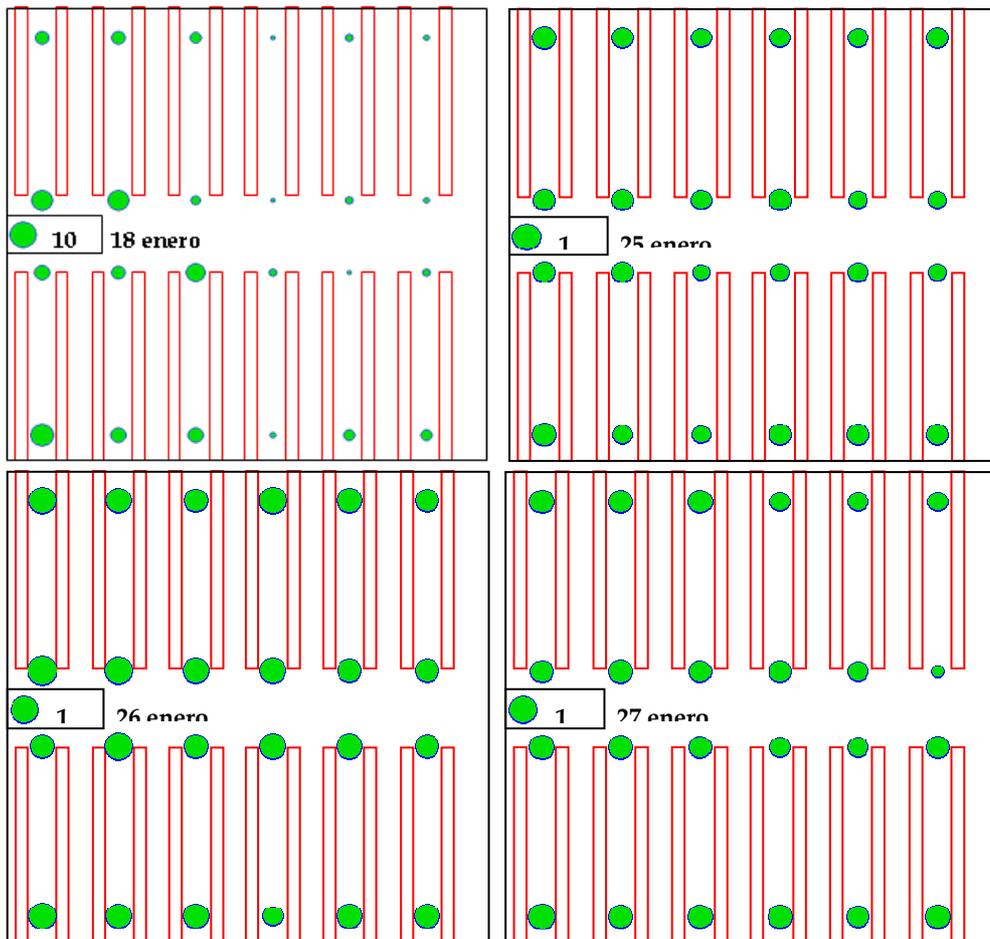


Figura 57. Temperatura tuberías invernadero 2 durante los ensayos

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

La temperatura media del cultivo a lo largo de los 5 días de ensayo fue similar, por encima de los 15°C, excepto el día 26 que su valor se elevó considerablemente. Si calculamos la temperatura media del cultivo para los 5 días de ensayo, obtenemos un valor del 16,43°C, valor próximo a los 17°C descrito en el trabajo de N. Tadj *et al.*, 2.010

Atendiendo a la temperatura máxima, se observa que los valores más altos se encuentran en la parte norte del invernadero (ramales 1 y 24) mientras que los más bajos se encuentran en la parte sur del invernadero, próximo al pasillo central.

Tabla 19. Temp X cult: temperatura media cultivo [°C], Temp Max cult: temperatura máxima cultivo [°C], Temp Min cult: temperatura mínima cultivo [°C]

	Temp X cult	Temp Max cult	Temp Min cult
18-ene	15,39	19,64 (r24-7)	12,96 (r16-7)
25-ene	16,93	19,51 (r1-3)	15,32 (r16-7)
26-ene	18,75	21,29 (r24-7)	15,45 (r7-3)
27-ene	15,94	18,19 (r1-3)	11,96 (r14-7)
31-ene	15,12	19,68 (r24-7)	13,4 (r1-7)

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

Del mismo modo como ocurre con la temperatura de las tuberías, la temperatura del cultivo fue bastante uniforme, manteniéndose similar en los diferentes puntos medidos, excepto en la zona próxima al ramal que se mantuvo frío durante todos los ensayos.

En la tabla 20 se resumen las condiciones medidas en el interior de los invernaderos 2 y 3 durante los cinco ensayos.

Tabla 20. Condiciones climáticas interiores durante los ensayos de estudio de la caldera mediante termografía. T_i , temperatura del aire interior [°C]; ΔT_{ie} , diferencia de temperatura entre el interior y el exterior [°C]; T_c , temperatura media del cultivo. ΔT_{ce} , diferencia de temperatura entre el cultivo y el exterior [°C]; $T_{tub-mano}^c$, temperatura media de la red de tuberías medida con la cámara de mano [°C]; $T_{tub-fija}^c$, temperatura media de las tuberías medida con la cámara fija [°C].

Fecha	Ensayo	Invernadero	T_i	ΔT_{ie}	T_c	ΔT_{ce}	$T_{tub-mano}^c$	$T_{tub-fija}^c$
18/01/2012	1	2 (caldera)	14,5±0,2	1,1	15,4±2,0	2,0	43,0±8,4	42,67±3,4
		3 (no calefactado)	12,4±0,6	-1,0	---	---	---	---
25/01/2012	2	2 (caldera)	16,3±1,4	4,9	16,9±1,0	5,3	60,0±11,8	55,2±3,1
		3 (no calefactado)	9,5±1,4	-1,9	---	---	---	---
26/01/2012	3	2 (caldera)	16,0±3,0	4,7	18,7±1,3	8,1	53,7±11,4	46,2±2,4
		3 (no calefactado)	11,3±1,3	-0,0	---	---	---	---
27/01/2012	4	2 (caldera)	15,5±0,9	5,7	15,9±1,2	6,1	59,2±12,9	56,5±2,0
		3 (no calefactado)	9,6±0,5	-0,2	---	---	---	---
31/01/2012	5	2 (caldera)	14,3±1,3	5,7	15,1±1,3	6,7	53,6±9,5	50,7±1,9
		3 (no calefactado)	6,4±1,1	-2,2	---	---	---	---

4.3 Análisis estadístico-mensual microclima de tres invernaderos con diferentes sistemas control climático

A partir de los datos climáticos de los tres invernaderos registrados cada 5 minutos se ha obtenido para cada parámetro los valores medios mensuales característicos (valor medio diario, medio diurno, medio nocturno, máximo y mínimo diario). Posteriormente se ha realizado el análisis estadístico pertinente para determinar diferencias significativas entre los distintos sistemas de climatización (calefacción por tuberías de agua-caldera de biomasa; calefacción por aire caliente-calefactores; y sin calefacción), en este caso se ha recurrido al análisis de pruebas de rango múltiple aplicando el procedimiento least significant difference (LSD) con un nivel de confianza 95%.

La comparativa se realiza entre sectores con igual malla anti-insectos y misma porosidad para que las diferencias entre mallas no acepten al análisis.

Solamente vamos a analizar los meses de Enero y Febrero debido a que los meses de Noviembre y Diciembre la caldera estaba en periodo de pruebas y fallaba en numerosas ocasiones. En mes de marzo, el sistema funciono pocos días debido a la mejora de las condiciones climáticas exteriores.

4.3.1 Temperatura media diaria

En los meses de Enero y Febrero el invernadero 1 con calefactores mantiene una temperatura media diaria menor que la del invernadero 2 con caldera de biomasa. Centrándonos en los meses de Enero y Febrero y comparando los sectores oeste de los dos invernaderos observamos un aumento de la temperatura media del invernadero 2, con diferencias de 0,3 y 0,5°C para Enero y Febrero. En los sectores este las diferencias se incrementan llegando a una temperatura media en el invernadero 2 de 1 y 1,2°C por encima de las temperaturas del invernadero 1.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Para los meses de Enero y Febrero ambos sistemas de calefacción mantienen la temperatura del invernadero entre 1 y 2°C por encima de la temperatura del invernadero testigo (sin calefacción).

Tabla 21. Temperaturas medias diarias durante el ensayo. *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	16,5±1,6	17,4 ±1,4 b	17,4±1,2 b	16,9±1,4 b	17,6±1,4 b	16,1±1,4 a
Diciembre	12,9±1,3	14,1±1,0 c	14,2±0,9 c	12,8±1,3 a,b	13,3±1,3 b	12,3±1,3 a
Enero	11,7±1,2	12,5±0,9 b	12,7±0,9 b	12,8±1,0 a	13,7±1,1 c	11,4±1,1 a
Febrero	10,1±2,6	11,9±1,9 b	12,0±1,7 b	12,4±1,8 b,c	13,2±2,0 c	10,7±1,7 a
Marzo	14,0±1,7	15,4±1,8 b	15,5±1,8 b	15,8±1,6 b,c	16,5±1,6 c	14,5±1,8 a

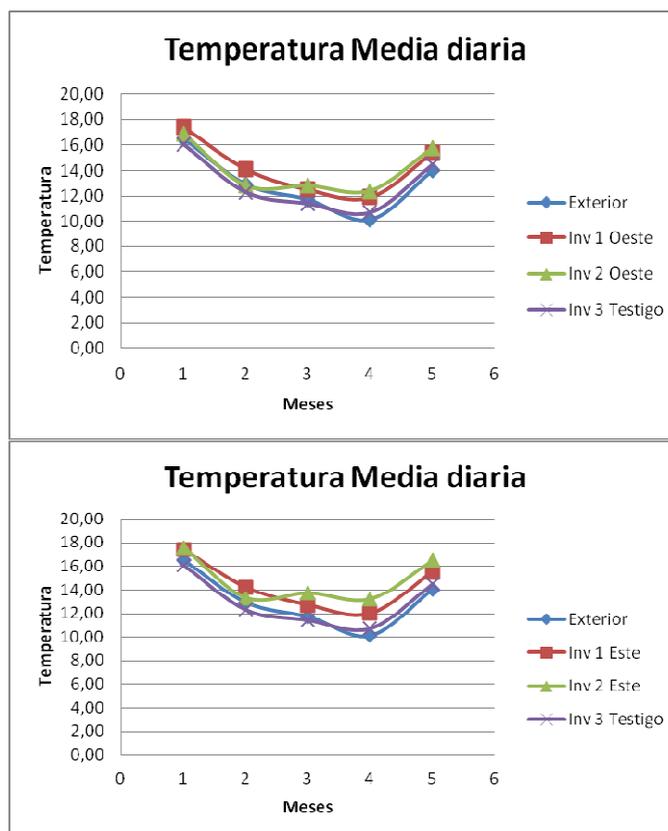


Figura 58. Temperaturas medias diarias durante el ensayo

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

4.3.2 Temperatura media diurna

No se observan diferencias significativas entre los dos sistemas de calefacción, debido a que en el periodo diurno las condiciones climáticas son más favorables para el cultivo y permiten limitar el uso de la calefacción.

Podemos apreciar que los invernaderos con calefacción consiguen aumentar la temperatura media diurna más de 1°C respecto al invernadero testigo.

Tabla 22. Temperaturas medias diurnas durante el ensayo [°C.] *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	18,4±1,6	19,6±1,5 b	19,6±1,6 b	19,0±1,5 a,b	19,5±1,4 b	18,3±1,5 a
Diciembre	15,5±1,2	16,5±1,5 c	16,6±1,3 c	15,7±1,3 b	16,2±1,3 b,c	15,0±1,2 a
Enero	14,1±1,6	15,7±1,6 b	15,8±1,4 b	15,3±1,0 b	15,9±1,0 b	14,1±1,3 a
Febrero	12,4±2,9	15,3±2,1 b	15,4±1,9 b	15,4±1,8 b	15,9±1,8 b	14,2±1,6 a
Marzo	15,7±2,0	18,4±2,3 b	18,3±2,3 b	18,3±2,0 a,b	18,6±2,0 b	17,2±2,2 a

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

4.3.3 Temperatura media nocturna

Atendiendo a los sectores Oeste de ambos invernaderos vemos que el invernadero 2 incrementa la temperatura media nocturna en torno a 1°C respecto al invernadero 1. Lo mismo ocurre con los sectores este pero en este caso, su valor asciende a los 2°C de diferencia.

Ambos sistemas de calefacción permiten elevar la temperatura media nocturna 1-2°C por encima del valor de temperatura media nocturna en el invernadero testigo, sin calefacción.

Tabla 23. Temperaturas medias diurnas durante el ensayo [°C]. *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	15,3±1,9	15,5±1,9 b	15,5±1,3 b	15,1±1,6 b	15,9±1,8 b	14,1±1,7 a
Diciembre	11,8±1,9	12,0±1,0 c	12,2±0,9 c	10,3±1,6 a,b	10,9±1,6 b	10,0±1,5 a
Enero	12,2±2,0	9,7±0,9 a,b	10,0±1,0 b,c	10,6±1,6 c	11,7±1,8 d	9,1±1,4 a
Febrero	9,3±2,7	8,1±1,8 b	8,4±1,7 b,c	9,2±2,0 c	10,2±2,3 d	6,9±1,9 a
Marzo	12,2±1,9	11,6±1,5 a,b	11,8±1,4 b,c	12,6±1,5 c	13,8±1,6 d	10,9±1,6 a

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

4.3.4 Temperatura máxima diaria

El valor de temperatura media diaria calculado no resulta fiable para comparar ambos sistemas de calefacción. No usaremos estos datos debido a que durante el día suele ser necesario abrir las ventanas del invernadero para evacuar calor, disminuyendo el valor de temperatura máxima.

Tabla 24. Temperatura máxima diaria por sectores [°C] *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	20,2±1,7	24,2±2,6 b	24,1±2,6 b	23,4±2,2 b	23,3±2,0 b	21,8±2,0 a
Diciembre	17,5±1,6	21,4±2,7 c	21,3±2,2 c	19,9±1,9 b	20,3±1,9 b,c	18,3±1,5 a
Enero	16,2±1,8	20,6±2,8 c	20,6±2,6 c	19,3±1,7 b	20,0±1,8 b,c	17,4±1,8 a
Febrero	14,8±3,0	21,4±3,5 b	21,3±3,3 b	20,8±2,3 b	20,8±2,2 a,b	19,3±2,3 a
Marzo	18,4±2,2	24,8±3,9 b	24,0±4,0 b	23,7±3,0 a,b	23,4±3,2 a,b	22,2±3,6 a

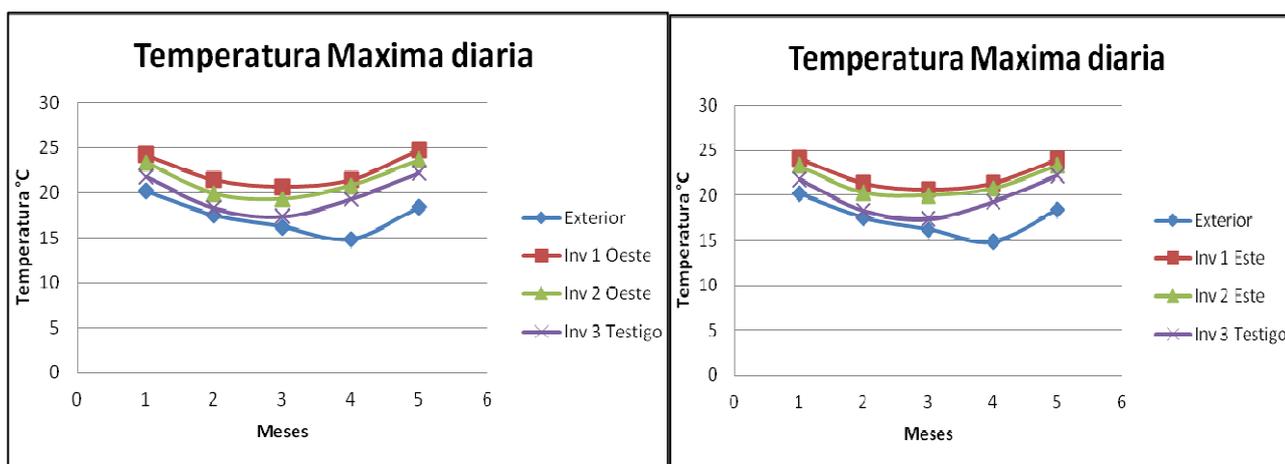


Figura 59. Temperaturas máximas diarias por sectores

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

4.3.5 Temperatura mínima diaria

El sistema de calefacción por tuberías consigue incrementar la temperatura mínima diaria en ambos sectores hasta 2°C por encima de la temperatura mínima diaria de los sectores del invernadero 1.

El uso de cualquiera de estos sistemas de calefacción (caldera biomasa o calefactores) mejoran la temperatura mínima diaria del invernadero sin calefacción al menos 1°C.

Tabla 25. Temperatura mínima diaria por sectores [°C] *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	12,8±1,9	13,6±1,8 b	13,8±1,6 b	13,3±1,8 b	14,1±2,2 b	12,2±2,0 a
Diciembre	8,6±1,8	10,3±1,3 c	10,6±1,3 c	8,2±1,9 a,b	8,9±1,9 b	7,98±1,8 a
Enero	7,6±1,4	8,03±0,7 b	8,3±0,7 b,c	8,9±2,0 c	9,7±2,1 d	6,9±1,5 a
Febrero	5,2±2,7	5,1±2,1 b	5,6±2,0 b	7,2±2,7 b,c	6,8±2,2 c	3,8±2,1 a
Marzo	9,8±2,1	9,7±1,7 a	10±1,7 a,b	10,8±1,8 b	12,0±1,9 c	9,2±1,9 a

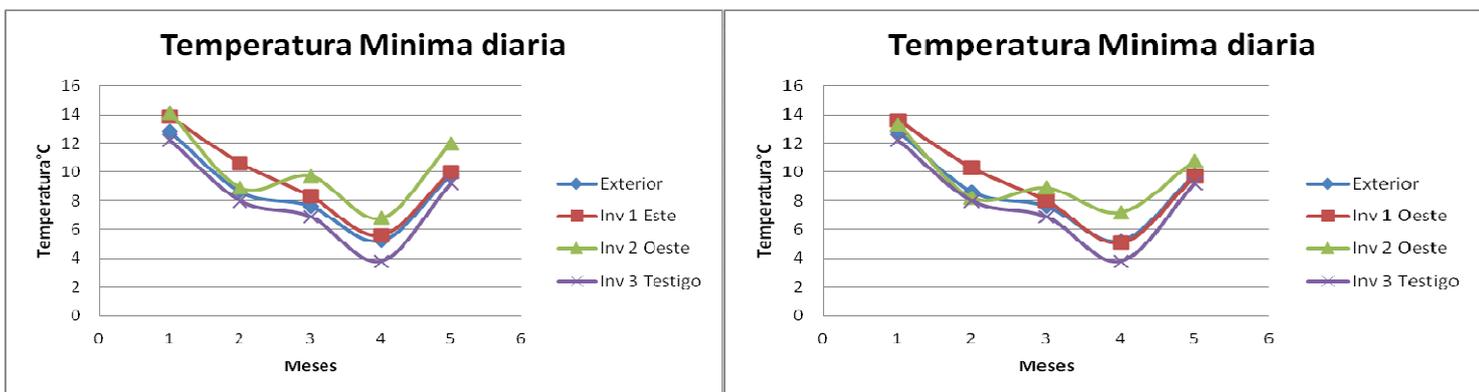


Figura 60. Temperaturas mínimas diarias por sectores

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

4.3.6 Humedad relativa media diaria

Aplicando cualquiera de los dos sistemas de calefacción, conseguimos eleva la humedad relativa respecto del exterior pero centrándonos en los invernaderos que poseen calefacción, no se aprecian grandes diferencias de humedad.

Tabla 26. Humedad relativa media diaria por sectores [%] *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	70,8±12,2	78±6 b	71±5 a	79±6 b	69±6 a	71±5 a
Diciembre	Averíada	82±3 c	74±3 b	85±3 d	75±3 b	71±5 a
Enero	Averíada	84±3 c	75±3 b	84±3 c	73±4 a	72±5 a
Febrero	65,8±12,4	76±3 c	69±3 b	77±4 c	66±3 a	68±3 b
Marzo	56,9±11,7	75±5 c	68±5 b	75±5 c	64±6 a	67±5 b

4.3.7 Humedad relativa media nocturna

La humedad relativa media nocturna en el interior de los invernaderos calefactados, es muy superior al valor medido en el exterior, y en menor medida respecto al invernadero sin calefacción (invernadero 3).

Comparando los invernaderos calefactados podemos observar que los sectores oeste de ambos invernaderos muestran los mismos valores, mientras que en los sectores Este, el invernadero con calefactores (invernadero 1) consigue alcanzar un porcentaje mayor que el del invernadero 2 (con caldera biomasa).

Tabla 27. Humedad relativa media nocturna por sectores [%] *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	75±16	82±7 b	75±4 a	84±5 b	74±6 a	76±5 a
Diciembre	averíada	88±2 c	80±2 b	91±2 d	80±2 b	76±6 a
Enero	averíada	90±2 c	81±2 b	90±2 c	78±2 a	77±5 a
Febrero	57±17	86±2 c	77±2 b	85±4 c	74±3 a	77±3 b
Marzo	62±15	86±4 c	78±3 b	85±4 c	72±4 a	77±4 b

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

4.3.8 Concentración de CO₂

Analizando los valores obtenidos, vemos un incremento de la concentración de CO₂ (con diferencias estadísticas significativas) en el invernadero 1. Este incremento de CO₂ puede estar debido a posibles pérdidas en la evacuación de los gases procedentes de la combustión del gasoil de los calefactores.

Tabla 28. Concentración media diaria de CO₂ [ppm]. *sectores con la misma letra (a,b,c...) indica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza 95%).

Sector	Exterior	Invernadero 1 Calefactores aire		Invernadero 2 Caldera Biomasa		Invernadero 3 Testigo
		Oeste	Este	Oeste	Este	Este
Noviembre	---	429±31 b	469±21 c	411±24 a	428±26 b	431±17 b
Diciembre	---	484±14 c	506±9 d	435±12 a	468±15 b	428±97 a
Enero	---	504±21 c	509±13 c	430±18 a	463±18 b	464±44 b
Febrero	---	459±22 b	502±14 d	407±17 a	452±14 b	485±13 c
Marzo	---	429±41 b	497±24 d	388±29 a	434±21 b	474±23 c

4.4 Consumo de combustible en invernadero 1 y 2

- Invernadero 1

Durante los cuatro meses del ensayo la calefacción por aire se programó para que funcionara cuando el invernadero mostraba una temperatura inferior a un valor establecido previamente. Una vez que se elevaba la temperatura por encima de ese valor mínimo, dejaba de funcionar.

Según los datos registrados, los calefactores funcionaron durante 30,21 horas o 1.812,6 minutos. El consumo total de combustible fue de 2.525 L de gasoil siendo el rendimiento medio por calefactor de 4,18 kg/h.

El gasto económico en gasoil fue diferente a lo largo de los cuatro meses debido a la oscilación de precios que sufre este combustible. Inicialmente se compraron 961 litros a 1,03 €/l, seguidamente 940 litros a 1,01 €/l y finalmente 500 litros a un precio de 1,06 €/l. El gasto total en combustible de los calefactores ascendió a 2.469,23 €.

Tabla 29. Consumo (l) y precio (€) combustible usado por calefactores

Fecha suministro Gasoil	Precio (€/L)	Cantidad (L)	Total (€)
22/11/2011	1,03	961	989,83
23/12/2011	1,01	940	949,4
14/02/2012	1,06	500	530
TOTAL		2401	2.469,23 €

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

- Invernadero 2

Para la calefacción mediante caldera de biomasa nos centramos en la cantidad de material consumido, ya que no podemos saber si dicho sistema trabaja a pleno funcionamiento o no.

Durante los 4 meses que duró el ensayo se consumió un total de 20 tn de biomasa. El precio del mismo fue distinto a lo largo del tiempo de ensayo.

Tabla 30. Consumo (l) y precio (€) combustible usado por caldera

Fecha suministro Biomasa	Cantidad (Tn)	Precio (€/Kg)	Total (€)
21/11/2011	3	0,25	750,48
05/01/2011	10	0,1813	1.813,54
06/02/2012	10	0,1652	1.652
TOTAL	23		4.216,02 €

5. Conclusiones

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Las principales conclusiones a las que se ha llegado tras el desarrollo de este proyecto son las siguientes:

1. En el sistema de distribución de aire mediante mangas de polietileno con los orificios de salida orientados hacia el suelo, el aire caliente generado impacta con el suelo tras salir de la manga de polietileno y asciende hacia la parte alta del invernadero. Seguidamente el aire se desplaza hacia el sur del invernadero para descender y volver a la zona inicial.

2. El uso de calefactores de aire caliente produce gran heterogeneidad climática. La temperatura máxima se encuentra a 5 m del lateral norte del invernadero mientras que la mínima se sitúa en el centro del invernadero. La parte sur del invernadero recoge temperaturas inferiores a la temperatura media del cultivo (17°C).

3. La calefacción a través de tuberías de agua caliente establece valores de temperatura similares en todo el invernadero, tanto para la temperatura de las tuberías como para las temperaturas del cultivo. Todo esto hará posible crear un microclima homogéneo.

4. Aplicando cualquiera de los dos sistemas de calefacción, incrementamos la temperatura media del interior del invernadero un mínimo de 1-2°C por encima del valor obtenido en el invernadero 3 (testigo). Para llegar a los valores más altos de temperatura, debemos usar la calefacción con tuberías de agua caliente, que la sitúan en el orden de 1-2°C por encima de la calefacción mediante calefactores.

5. La calefacción mediante tuberías de agua caliente mantiene la temperatura del cultivo por encima de la temperatura del aire interior pero esto no ocurría con los calefactores de aire caliente, que no consiguen elevar la temperatura del cultivo por encima del valor del aire interior.

6. Las tuberías de agua caliente consiguen mayor uniformidad en la temperatura interior, aunque no se haya medido la temperatura del aire en diferentes puntos como en los ensayos realizados en 2010/2011, la gran uniformidad observada en la temperatura del cultivo dista mucho de la gran heterogeneidad observada en la temperatura del aire observada con los calefactores de aire.

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

7. Tras obtener el gasto de combustible para ambos sistemas de calefacción, la caldera además de tener un coste de instalación más caro que los calefactores, consume más y, aunque mejora las condiciones climáticas del invernadero, no existen grandes diferencias climáticas.

Tras analizar los resultados de nuestro proyecto, podemos afirmar que el sistema de calefacción mediante tuberías de agua caliente consigue crear un microclima interno más favorable para el desarrollo óptimo del cultivo pero, esta mejora de clima viene acompañada de un incremento del coste económico, ya que la instalación y mantenimiento (consumo de combustible) resulta más caro.

Para poder elegir entre un sistema de calefacción u otro, deberíamos analizar la producción de cada invernadero y ver si podríamos compensar las inversiones económicas iniciales de la instalación de ambos sistemas de calefacción.

6. Futuros trabajos

Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría sónica triaxial y termografía

Las futuras investigaciones deben centrarse en calcular las producciones de cada cultivo y ver en cuantas campañas podrían amortizarse la instalación de ambos sistemas de calefacción.

Tras analizar la rentabilidad de los sistemas, podría investigarse la forma de reducir la heterogeneidad de temperaturas que produce el sistema de calefacción mediante calefactores. Algunas formas de conseguirlo podrían ser:

- Incorporar a los sistemas de distribución del aire caliente ramificaciones de las gomas de distribución del aire que puedan pasar por encima de todas o algunas de las líneas de cultivo.
- Usar mallas mas tupidas o densas, ya que se ha demostrado que ayudan a reducir el consumo de energía de los calefactores (Amsen, 1986; Kittas et al., 2003; Teitel et al., 2009).
- Aislar los laterales del invernadero (Singh y Tiwari; 2000).
- Usar doble cubierta (Gupta y Chandra; 2002)

Otra línea de trabajo podría ser aplicar en el mismo invernadero ambos sistemas de calefacción y así mejorar el clima del invernadero consiguiendo mantener unas temperaturas interiores mas uniformes.

7. Bibliografía

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

- AMIRO B.D., THURTELL G.W. Y GILLESPIE T.J., 1983, A small infrared thermometer for measuring leaf temperatures in leaf chambers. *Journal of Experimental Botany*, 34: 1569-1676.
- AMSEN M.G., 1986, Thermal Screens in Greenhouses: Diurnal Variations in Heat Consumption. *J. agric. Engng Res.*, 33, 79-82.
- BAILLE A., LÓPEZ J.C., BONACHELA S., GONZÁLEZ-REAL M.M. Y MONTERO J.I., 2006, Night energy balance in a heated low-cost plastic greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 107–118.
- BARTZANAS T., TCHAMITCHIAN M. Y KITTAS C., 2005, Influence of the Heating Method on Greenhouse Microclimate and Energy Consumption. *Biosystems Engineering*, 91 (4): 487-499.
- BOULARD T., MENESES J.F., MERMIER M. Y PAPADAKIS G., 1996, The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79: 61–77.
- 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.
- CEBECI T., 2004, *Analysis of Turbulent Flows*. California State University, USA: Elsevier Science.
- CEMEK, B., D. YUSUF, S. UZUN, Y V. CEYHAN., 2006, The effects of different greenhouse covering materials on energy requirement, growth, and yield of aubergine. *Energy*, 31(12): 1780-1788.
- CHANDRA, P. Y ALBRIGHT L.D., 1989, Analytical determination of the effect on greenhouse heating requirements of using night curtains. *Trans ASAE*, 23(4): 994-1000.
- CHAPMAN L., 2007, Potential applications of near infra-net hemispherical imagery in forest environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143: 151-156.
- FLIR., 2006, *Manual ThermaCAMTM Researcher*. Professional edition. Version 2.8 SR-3. FLIR System. Sweden.
- FUCHS M. Y TANNER C.B., 1966, Infrared thermometry of vegetation. *Agronomy Journal*, 58: 597-601.
- GHOSAL, M.K. Y TIWARI G.N., 2004, Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy*, 76(5): 603-613.

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

- GRANT R.S., KIM W.T., BEWLAY B.E. Y CANTOR B., 1989, The monitoring of deposit surface temperatures during spray-forming by infrared thermal-imaging. *Scripta Metallurgica*, 23: 1651-1656.
- GUPTA M.J., Y CHANDRA P., 2002, Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*, 27(8): 777-794.
- HAND D.W., 1984, Crop responses to winter and summer CO₂ enrichment. *Acta Horticulturae*, 162: 45-64.
- HEILMAN J.L., HEILMAN W.E. Y MOORE D.G., 1981, Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. *Agronomy Journal*, 73: 403-406.
- HIPPS L.E., 1989, The infrared emissivities of soil and *Artemisia tridentate* and subsequent temperature corrections in a shrub-steppe ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 27: 337-342.
- KITTAS C., BARTZANAS T. Y JAFFRIN A., 2003, Temperature gradients in a partially shaded large greenhouse equipped with evaporative cooling pads. *Biosystems Engineering*, 85(1): 87-94.
- KITTAS C., KATSOULAS N., BARTZANAS T., MERMIER M. Y BOULARD T., 2008, The impact of insect screens and ventilation openings on the greenhouse microclimate. *Transactions of the ASABE*, 51(6): 2151-2165.
- LAMPRECHT I., SCHMOLZ E., HILSBURG S. Y SCHLEGEL S., 2002, A tropical water lily with strong thermogenic behaviour-thermometric and thermographic investigations on *Victoria cruziana*. *Thermochimica Acta*, 382: 199-210.
- LATHI B.P., 1994, *Introducción a la teoría y sistemas de comunicación*. Balderas, México: Ed. Limusa.
- LAY R.M. Y BRAGG G.M., 1988, Distribution of Ventilation Air - Measurement and Spectral Analysis by Microcomputer. *Building and Environment*, 23(3): 203-213.
- LEUZINGER S. Y KÖRNER C., 2007, Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146: 29-37.
- LOOMANS M.G.L.C., 1998, *The measurement and simulation of indoor air flow*. MS thesis, Eindhoven, Holanda: Technische Universiteit Eindhoven.
- LÓPEZ, A., 2011, *Contribución al Conocimiento del Microclima de los Invernaderos Mediante Anemometría Sónica y Termografía*. Tesis Doctoral, Universidad de Almería, Almería, España.

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

- LÓPEZ, A., VALERA D.L., Y MOLINA-AIZ F.D., 2011, Sonic anemometry to measure natural ventilation in greenhouses. *Sensors*, 11(10): 9820-9838.
- LÓPEZ A., MOLINA-AIZ F.D., VALERA D.L., PEÑA A., 2012, Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography. *Scientia Horticulturae*, 137: 49–58
- MAHAN J.R. Y YEATER K.M., 2008, Agricultural applications of a low-cost infrared thermometer. *Computers and electronics in agriculture*, 64 (2): 262-267.
- MENESES J.F. Y MONTEIRO A.A., 1990, Ducted air heating systems in greenhouses: Experimental results. *Acta Horticulturae*, 263: 285-292.
- MOLINA-AIZ F.D., VALERA D.L., PEÑA A.A., GIL J.A. Y LÓPEZ A., 2009, A Study of Natural Ventilation in an Almería-Type Greenhouse with Insect Screens by Means of Tri-sonic Anemometry. *Biosystems Engineering*, 104: 224-242.
- 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., BAUDOIN W. Y GARNAUD J.C., 1988, *Cultures protégées en climat méditerranéen*. FAO, Roma.
- OUYANG Q., DAI W., LI H. Y ZHU Y., 2006, Study on dynamic characteristics of natural and mechanical wind in built environment using spectral analysis. *Building and Environment*, 41: 418-426.
- PEARCE R.S. Y FULLER M.P., 2001, Freezing of Barley Studied by Video Infrared Thermography. *Plant Physiology*, 125: 227-240.
- PERDIGONES A., GARCÍA J.L., PASTOR M., BENAVENTE R.M., LUNA L., CHAYA C., Y DE LA PLAZA, S., 2006, Effect of heating control strategies on greenhouse energy efficiency: experimental results and modelling. *Transactions of the ASABE*, 49(1): 143–155.
- RAHKONEN J. Y JOKELA H., 2003, Infrared radiometry for measuring plant leaf temperature during thermal weed control treatment. *Biosystems Engineering*, 86(3): 257-266.
- RAY S.J., WILLS J.B., HONEA G.S., BUSCHERMOHLE M.J., STRAW R.A. Y RAMAN D. R., 2005, A one-year study of a supplemental air distribution system for greenhouses. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(5): 915–924.
- SHILO E., TEITEL M., MAHRER Y. Y BOULARD T., 2004, Air-flow patterns and heat fluxes in roof-ventilated multi-span greenhouse with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122: 3-20.
- SINGH R.D. Y TIWARI G.N., 2000, Thermal heating of controlled environment greenhouse: A transient analysis. *Energy Conversion and Mgmt.*, 41(5): 505-522.

**Análisis del microclima de invernaderos mediterráneos calefactados mediante anemometría
sónica triaxial y termografía**

- STULL R.B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers.
- SUTHERLAND R.A. Y BARTHOLIC J.F., 1979, Emissivity correction for interpreting thermal radiation from a terrestrial surface. *Journal of Applied Meteorology*, 18: 1165-1171.
- SVENDSEN H., JENSEN H.E., JENSEN S.E. Y MOGENSEN V.O., 1990, The effect of clear sky radiation on crop surface temperature determined by thermal thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology*, 50(3): 293-243.
- SWINKELS, G., SONNEVELD P. Y BOT G., 2001, Improvement of greenhouse insulation with restricted transmission loss through zigzag covering material. *J. Agric. Eng. Res.* 79(1): 91-97.
- TADJ N., BARTZANAS T., FIDAROS D., DRAOUI B. Y KITTAS C., 2010, Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution. *Transactions of the ASABE*, 53(1): 225-238.
- TANNY J., HASLAVSKY V. Y TEITEL M., 2008, Airflow and heat flux through the vertical opening of buoyancy-induced naturally ventilated enclosures. *Energy and Buildings*, 40: 637-646.
- TEITEL M., BARAK M. Y ANTLER A., 2009, Effect of cyclic heating and a thermal screen on the nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. *Biosystems engineering*, 102, 162-170.
- TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., SOULIOTIS M., TONUI J.K. Y KAVGA A., 2005, Irradiation aspects for energy balance in greenhouses. *Acta Hort.*, 691: 733-740.
- VON ZABELTITZ CH., 1999, *Greenhouse structures*. In: G. Stanhill and H.Z. Enoch (eds.), *Greenhouse Ecosystems*, Elsevier, Amsterdam. pp 17-69.
- ZHANG, Y., GAUTHIER L., DE HALLEUX D., DANSEREAU B. Y GOSSELIN A., 1996, Effect of covering materials on greenhouse microclimate. *Agric. and Forest Meteorology*, 82: 227-244.