

CAPÍTULO 2
EL INVERNADERO
MEDITERRÁNEO

CAPÍTULO 2. EL INVERNADERO MEDITERRÁNEO

are not living against nature, they who covet a rose in winter, ...

SÉNECA (citado en Stanghellini, 1987)

2.1 INTRODUCCIÓN

Un invernadero es aquella estructura que, además de proteger al cultivo de la lluvia y el viento, permite el paso de la radiación solar dificultando la pérdida de calor, en particular la componente del infrarrojo térmico. El grado de modificación climática va a depender del nivel tecnológico de los materiales empleados en su construcción y de los equipos complementarios de climatización, calefacción, humidificación, ventilación, abonado carbónico, iluminación artificial, etc.

Esta modificación climática permite avanzar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar fuera de época. En los últimos años se ha producido una expansión de la superficie protegida, acolchados, túneles, invernaderos, a causa de la demanda por parte del consumidor de los países desarrollados de productos frescos y económicos a lo largo de todo el año.

El invernadero llamado Mediterráneo es aquel propio de regiones cálidas o templadas, caracterizado por presentar cubierta plástica y que normalmente no dispone de calefacción, o sólo para situaciones de emergencia. Se le denomina Mediterráneo para diferenciarlo del invernadero original de las regiones europeas más frías. Estos últimos acostumbran a tener como material de cubierta el vidrio y disponen de calefacción.

El invernadero Mediterráneo no es exclusivo de esta región. Por tratarse de estructuras sencillas se ha adaptado en muchas zonas de los países latino americanos y otras regiones de clima

templado o semiárido. Especialmente, pero no exclusivamente, en zonas socio-económicamente deprimidas ha significado un empuje económico trascendental.

La principal problemática que afecta a los invernaderos mediterráneos se debe al largo período estival, con altas temperaturas que dificultan el cultivo y el trabajo en su interior. Las técnicas de refrigeración pasan por la optimización de la ventilación natural, la utilización de sistemas de humidificación y en casos extremos la ventilación forzada (Montero y col., 2002).

Desde el punto de vista ambiental los invernaderos presentan aspectos negativos como son las necesidades energéticas en climas fríos, la acumulación de residuos plásticos y aspectos paisajísticos. Mateo Box (1996) califica la agricultura bajo plástico como un brutal atentado al paisaje además de conllevar graves riesgos de contaminación de tipo residual (plásticos, vegetales, envases,...) y de los materiales fitosanitarios que consumen, no justificándose según este autor la conveniencia de sustraer la agricultura de la imprevisión inherente a las condiciones climáticas, prolongar el periodo productivo o avanzar la entrada de un producto en el mercado.

Los aspectos positivos son la mejor utilización de los recursos naturales sol, suelo y especialmente el agua. El tomate cultivado en invernadero consume un 45% menos de agua respecto al cultivado en el exterior, mientras que para el pimiento se reduce a un 24% (Pérez Parra y col., 2002). El mismo hecho de poder aislarlo de las condiciones exteriores permite avanzar hacia el invernadero *cerrado* donde las diferentes emisiones podrán ser controladas, ej. sistemas de recirculación.

2.2 HISTORIA

Los primeros intentos de la humanidad para proteger los cultivos de la intemperie de los que se tienen noticias datan del Imperio Romano (Wittwer y col., 1995). Éstos consistían en banquetas móviles de pepinos u otros cultivos hortícolas, colocadas en el exterior en los días soleados y en el interior con condiciones atmosféricas más desfavorables. Dichas banquetas se cubrían con láminas de mica o alabastro que hacían la función de cubierta. Parece ser que esta práctica desaparece con el declive del imperio romano (Dalrymple, 1973) y no es hasta las postrimerías del siglo XV en que aparecen los primeros precursores de los invernaderos, inicialmente en Inglaterra, Holanda, Francia, Japón y China. Se tratan en un principio de cajones de madera o bambú, cubiertos por una protección (lámina o campana) de vidrio, cultivándose una amplia variedad de verduras y pequeños frutos.

Durante el siglo XVII ya encontramos recintos que pueden considerarse propiamente invernaderos pero que tienen únicamente un frontal de vidrio en forma de techo inclinado. En el

siguiente siglo existen construcciones con paredes laterales y frontal de vidrio y hacia finales del XVIII ya se dispone de toda la estructura de vidrio. Los países precursores son principalmente Inglaterra, Holanda, Francia y los países escandinavos. Hacia finales del siglo XIX la producción comercial de cultivos se haya bien establecida.

El desarrollo de estructuras de forzado e invernaderos pronto se expande desde Europa a América. En 1960 Holanda tiene la mayor concentración de invernaderos de vidrio (5000-6000 ha).

A partir de los años 50 comienza la expansión, principalmente en Asia y el área Mediterránea, de invernaderos con cubierta de plástico y en principio no calefactados. Los cultivos que se realizan son fundamentalmente comestibles, concentrándose en el Norte de Europa los cultivos de tipo ornamental. Actualmente, sin embargo, ha comenzado una expansión de la floricultura también en el área Mediterránea especialmente debida a la aplicación de más tecnología.

El cultivo hidropónico se inicia en Estados Unidos a partir de los 60 (Jensen y col., 1985) y el riego por goteo en Israel también por estas fechas.

El uso de la calefacción en los invernaderos empezó hace 500 años. A finales del siglo XV y durante el XVI se usan hogueras de carbón en el suelo del invernadero. En el siglo XVII aparecen las primeras estufas. El siglo XVIII trae las primeras estufas con chimeneas que atraviesan el invernadero repartiendo calor y, a partir del siglo XIX se utilizan las calderas con agua caliente y que usan como combustible carbón, hasta nuestros días en que el combustible ha sido sustituido por gas-oil o gas (Van den Mijzenberg, 1980).

2.3 SUPERFICIE CULTIVADA

La superficie mundial cubierta por algún tipo de protección varía entre cuatro y cinco millones de hectáreas. Dejando de lado protecciones de tipo acolchado, cubiertas y túneles bajos y centrándonos en invernaderos de plástico más o menos tecnificados, a escala mundial la superficie actual supera las 450.000 ha, (tabla 2.1) concentrándose las mayores superficies en el sureste asiático, China (200.000 ha), Japón (70.000 ha) y Corea (27.000 ha) seguido de la cuenca Mediterránea. La superficie de invernaderos en el área Mediterránea ha pasado de 68.000 ha a finales de la década de los 80 a unas 130.000 ha en la actualidad (tabla 2.2), esto supone un tercio de la mundial. En la provincia de Almería existe la mayor concentración del litoral mediterráneo, aproximadamente 25.000 ha (Pérez Parra y col., 2002).

Tabla 2.1 Superficie cubierta por algún tipo de protección a escala mundial. Elaboración propia a partir de (Papaseit y col., 1997, Pérez Parra y col., 2002)

	Asia	América	Africa	Europa	TOTAL
acolchado	3.500.000	200.000	15.000	380.000	4.095.000
cubiertas	12.000	3.150		40.000	68.000
túneles bajos	192.960	9.000	11.050	90.000	372.700
invernaderos plástico	320.000	10.000	18.000	110.000	458.000
invernaderos vidrio				15.500	40.700

En Europa, España es el país con una superficie mayor de invernaderos, 48.749 ha. Tras España se sitúa Italia con 27.721 ha y Francia con 9.200 ha. En el área Mediterránea, los países no europeos con mayor superficie de invernaderos son Turquía con unas 14.000 ha y Marruecos con 10.000 ha (Pérez Parra y col., 2002).

Tabla 2.2 Comparación superficie cubierta en el área Mediterránea, incluye N de África y Oriente próximo, respecto al resto de Europa. (Elaboración propia a partir de (Wittwer y col., 1995)

	Mediterráneo	Resto Europa
acolchado	191.000	15.000
cubierta	10.300	27.000
túneles bajos	90.500	33.000
invernaderos plástico	130.000	16.700
invernadero vidrio	7.900	25.800

De la superficie cubierta por invernaderos en España la mayoría están dedicadas al cultivo de hortalizas representando un 19% de la superficie total cultivada de hortalizas.

Para cultivos ornamentales las estadísticas del MAPA (2000) cifran en 2.750 ha bajo invernadero y 1.800 ha al aire libre, se trata por tanto de un 65% de la producción que se realiza bajo alguna protección. En Catalunya la superficie cultivada bajo invernadero representa un 6% del total de cultivos de hortalizas y un 59% de los cultivos ornamentales (tabla 2.3). La mayoría de las explotaciones se encuentra por debajo de 5 ha, tratándose principalmente de explotaciones familiares.

Tabla 2.3 Superficie cultivada al aire libre y en invernadero para hortaliza y ornamentales en España. (MAPA, 2000)

Cultivo	España ha	Catalunya ha
Total tierras cultivo regadío ⁽¹⁾	3.397.175	255.026
hortalizas aire libre	334.066	18.246
hortalizas en invernadero	76.145	1.262
Total hortalizas	410.211	20.751
Ornamentales aire libre	1.794	157
Ornamentales en invernadero	2.751	229
Total Ornamentales	4.545	387

⁽¹⁾ herbáceos, barbecho y leñosos

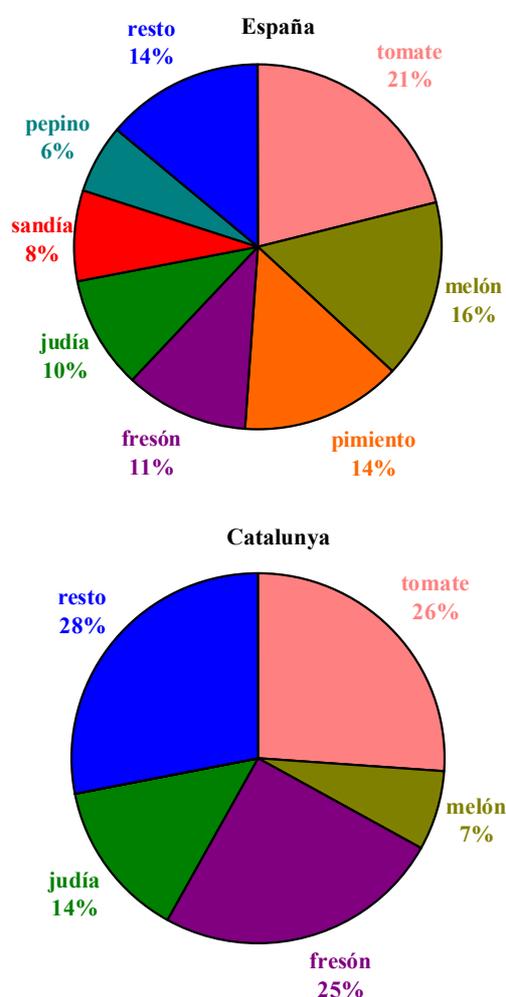


Figura 2.1 Principales cultivos bajo invernadero (MAPA, 2000)

Las principales hortalizas producidas en España en invernadero son tomate, melón, pimiento y fresón, representando el 64 % de la superficie cultivada bajo invernadero en España (figura 2.1). Esta producción se halla localizada a lo largo de la costa Mediterránea, adquiriendo más

importancia cuanto más hacia el Sur. También en las islas Canarias existe una producción importante de tomate de invierno. En total en España existen 58.800 ha de cultivo de tomate, de las cuales un 26 % se realizan bajo invernadero.

En Catalunya los principales cultivos son el fresón, el tomate y la judía verde, que representan a su vez el 66% del total de hortalizas producidas bajo algún tipo de protección (figura 2.1). El 80% de la producción de fresón se realiza bajo protección. En el caso del tomate es un 12%.

2.4 IMPORTANCIA ECONÓMICA

En España, se estima que la producción de invernaderos representa más del 25% de la renta hortícola española (Briassoulis y col., 1997), en la zona de Almería, 25.000 ha, produjeron 1.600 millones de € (64.000 € ha⁻¹) (Stanghellini y col., 2003), En el caso de Catalunya las más de 500 ha del Maresme produjeron 76 millones de € (152.579 € ha⁻¹) en 1996 (Montero, 1997). Algunos cultivos florales en Holanda alcanzan los 400.000 € ha⁻¹ (Stanghellini y col., 2003).

El principal destino de la producción hortícola es el mercado local, y de la parte que se dedica a exportación un 90% es para países europeos (Martínez, 1999). Holanda con una alta tecnología en sus invernaderos compite con los productos mediterráneos.

Los productos de la horticultura ornamental representaron en 1996 un 3,5 % de la producción vegetal final con un valor de la producción nacional en origen de más de 566 millones de € (Zalbidea, 1998)

El volumen de exportación de planta ornamental alcanzó, durante 1997, un total de 88.333 toneladas con un valor de 170,9 millones de €, de los cuales 97 millones corresponden a flor cortada. Por otra parte la importación de estos productos ascendió durante 1997 a 38.634 toneladas con un valor de 98 millones de € (Zalbidea, 1998)

2.5 DESCRIPCIÓN DEL INVERNADERO MEDITERRÁNEO

2.5.1 Tipo de Estructura

El término agricultura protegida abarca desde acolchados (protección contra malas hierbas y un ligero efecto térmico mediante plástico en el suelo, figura 2.2.a), túneles bajos (ej. cultivo del fresón, figura 2.2.b), túneles (figura 2.2.c) e invernaderos multitúnel (figura 2.2.d). Una clasificación común entre los invernaderos es la que distingue entre invernaderos de países fríos,

altamente equipados con sistemas de climatización y con cubierta de vidrio y el invernadero popularizado como invernadero Mediterráneo.

El invernadero Mediterráneo se caracteriza por estructuras de bajo coste debido a una menor capacidad de inversión del productor. Sin embargo se observa una tendencia hacia la mejora de las estructuras y los equipamientos a medida que se amortizan las instalaciones y se pretende mejorar la calidad del producto (Lorenzo y col., 1997).

En la estructura de bajo coste se emplean diferentes materiales según la disponibilidad de la zona. Son ejemplos de estas construcciones los invernaderos o protecciones de madera (figura 2.3.a) o los invernaderos parral (figura 2.3.b).



a)



b)



c)



d)

Figura 2.2. a) acolchado; b) túneles bajos; c) túnel y d) multitúnel

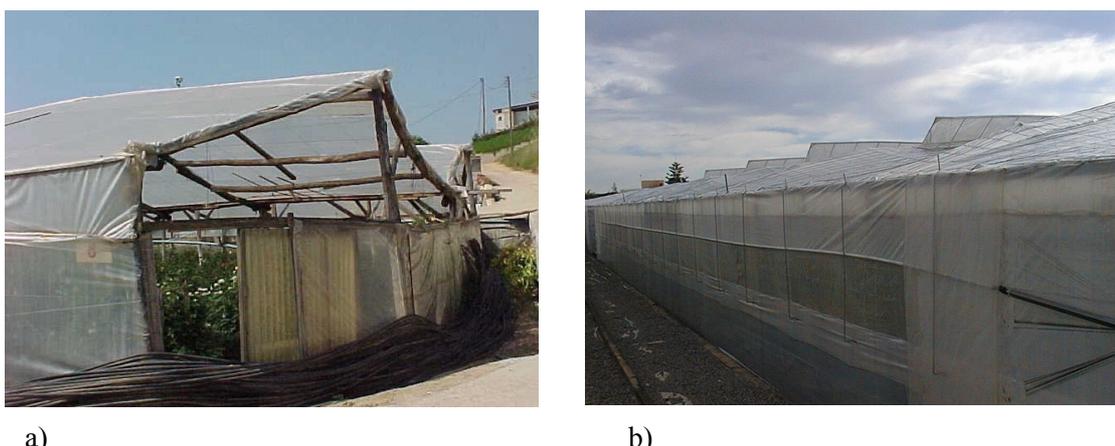


Figura 2.3 a) invernadero de madera; b) invernadero parral

Por contraste con este tipo de invernadero más artesanal, existe en la zona un tipo de invernadero más industrial con estructura de acero y cubierta de plástico (figura 2.4).

El tratamiento aconsejado para el acero es de galvanizado en frío, Z350, sendzimir con $350 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ en doble cara en toda la estructura exterior y Z275 en refuerzos laterales y tirantes, la canal deberá galvanizarse en caliente G60, esto significa $60 \mu\text{m}$ de grueso por cada lado. Las tuberías de recogida del agua de lluvia son de PVC.

Las ventanas son elementos de especial interés en las estructuras. Una correcta ventilación permitirá actuar, de forma económica, sobre la temperatura, la humedad relativa y los niveles de CO_2 dentro del invernadero. En este tipo de invernadero industrial, generalmente, la ventana abre a la altura de la canal, levantando medio techo a todo lo largo del invernadero. Cada nave puede disponer de ventanas independientes. La altura de apertura acostumbra a ser entre 0,6 y 1 m, esto significa un 12,5 % de superficie de ventilación para naves de 8 m. La mayoría de invernaderos poseen ventanas laterales que abren entre 1 y 1,5 m de altura y cubren toda la pared lateral. El funcionamiento de estas ventanas laterales, generalmente, es manual. Las ventanas cenitales funcionan mediante un motor que puede estar automatizado en función de un termostato.

La adopción de un mayor nivel tecnológico pasa por la implantación de sistemas de climatización gestionados mediante ordenadores. Los diferentes componentes climáticos pueden ser ventilación, calefacción, uso de cortinas de sombreado o térmicas, sistemas de aporte de humedad, etc.

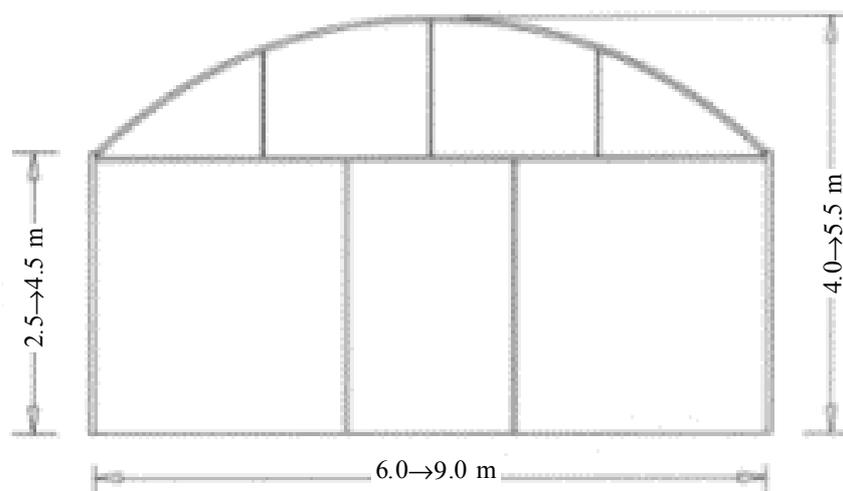


Figura 2.4. Esquema y dimensiones de un invernadero industrial

El material de cubierta condicionará el microclima que se genera en el interior del invernadero. El material ideal es aquel que presenta una gran transmisividad a la radiación solar, opacidad a la radiación térmica y unas características físicas que lo hagan resistente a la rotura.

Entre los materiales más utilizados destacan los polietilenos de baja densidad, LDPE, con diferentes aditivos que los hacen más resistentes a las radiaciones ultravioletas y les confieren propiedades térmicas. En este último caso se conocen como polietilenos térmicos. Otro plástico ampliamente empleado para la fabricación de materiales de cubierta ha sido el etilvinilacetato, EVA. La combinación del LDPE y el EVA ha dado lugar a los plásticos multicapas, materiales que se han popularizado en los últimos años. Todos estos materiales son plásticos flexibles con una duración de 1 a 3 años según sus propiedades.

Existe también un tipo de cerramiento basado en placas de plástico rígido, generalmente policarbonato, PC, que mejoran las propiedades térmicas. Antiguamente el material utilizado era poliéster, pero este material perdía rápidamente sus propiedades. Hoy en día también se pueden encontrar invernaderos con placas de cloruro de polivinilo, PVC, especialmente en Japón y Israel, y polimetacrilato, PM. Este último material se utiliza principalmente en placas alveolares que aunque reducen sus propiedades luminosas presenta unas mejores propiedades térmicas, debido a la doble pared. La placa rígida, aunque más cara, presenta la ventaja de una mayor duración, de 10 a 15 años.

2.5.2 Cultivo en suelo

En el área Mediterránea, la mayor parte de cultivos bajo invernadero se plantan directamente en el suelo. El riego se realiza por goteo y se incorporan los fertilizantes directamente al agua de

riego. Los cultivos protegidos en el área Mediterránea se localizan generalmente a lo largo de la costa, donde abundan los suelos de textura franco-arenosos. Esto conlleva que los principales problemas estén relacionados con su alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua y por lo tanto por su poca capacidad de intercambio catiónico. Por otra parte, presentan las ventajas de que se trata de suelos de fácil laboreo y escaso encharcamiento, cosa que los salvaguarda de ciertas enfermedades. Esta área también se caracteriza por una tendencia a la alcalinidad y salinidad tanto en el suelo como en el agua de riego (FAO, 1990).

2.5.2.1 Fertilizantes

La cantidad de fertilizantes a aportar depende de las características del suelo y agua. En función de las necesidades de la planta y de los análisis químicos del suelo y del agua se determinan la dosis y tipo de abonado a aplicar.

La tabla 2.4 muestra las dosis recomendada de los diferentes nutrientes, expresados en mmol de nutriente por litro de agua aportada al cultivo, a suministrar en cultivo de tomate en suelo para cada una de las fases de desarrollo siguientes (ADV, 2001) :

- Fase I: plantación a floración del tercer ramillete
- Fase II: floración del tercer al sexto ramillete
- Fase III: floración del sexto ramillete hasta final cosecha

La cantidad de fertilizantes a aplicar variará en función del análisis de suelo y agua.

Tabla 2.4 Nutrientes a aportar según las fases de cultivo (ADV, 2001)

Nutriente	Fase I mmol L ⁻¹	Fase II mmol L ⁻¹	Fase III mmol L ⁻¹
Amonio (NH ₄ ⁺)	1.5	1.5	1.0
Calcio (Ca ²⁺)	6	5.3	4
Hierro (Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	0.02	0.02	0.03
Magnesio (Mg ²⁺)	2	2	1.5
Potasio (K ⁺)	7.5	9.0	9.5
Nitratos (NO ₃ ⁻)	12	13	10
Fosfatos (H ₂ PO ₄ ⁻)	2	2	1.5
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	3.5	3	12.3

2.5.3 Cultivo en sustrato

En cultivo en sustrato también conocido como hidropónico se inicia a finales del siglo XIX con fines experimentales y con una aplicación práctica relativamente reciente. Los productores de la zona norteamericana han utilizado profusamente esta técnica, mientras que en la zona Mediterránea esta menos extendida (Tognoni, 2003).

En el área Mediterránea se cultivan cerca de 4000 ha sin suelo principalmente con sustratos inertes que varían para cada país. La arena, perlita, lana de roca, puzolana, grava volcánica, fibra de coco son los más populares. El área de cultivo sin suelo se está incrementando en general en los países mediterráneos. Se estima que existen 1600 ha en Francia y 1000 en España (Martínez, 1999).

Desde un punto de vista ecológico, el sustrato supone evidentes ventajas, precisamente por su condición de aislamiento del suelo o terreno natural, aunque hay que oponer ciertos inconvenientes en cuanto al origen y acopio de los materiales necesarios para su preparación, así como a las características de los residuos que pueden generarse en algunos casos una vez utilizados aquellos (Mateo Box, 1996). Así por ejemplo, el empleo de lana de roca supone eliminar entre 60 y 80 m³ ha⁻¹ de dicho material cada dos años. La lana de roca no es biodegradable y sus residuos son nocivos para la salud humana (Marfà, 2000) citando a (Benoit, 1990). No ocurre lo mismo con los restos de sustratos orgánicos que sí son biodegradables y pueden incorporarse al suelo.

El sustrato más comúnmente utilizado en nuestra zona es la perlita. Se acostumbra a presentar en saco de LDPE relleno de perlita con un volumen de 36 L cada uno. La perlita en su estado natural es una roca silíceo volcánica del grupo de las riolitas, compuesta principalmente por SiO₂ y Al₂O₃ (tabla 2.5). Sometida a un tratamiento térmico de temperaturas entre 850-900 °C, la perlita se expande ocupando entre 7 y 15 veces su volumen original. La perlita en estado natural tiene una densidad aparente alrededor de 1.100 kg·m⁻³.

Tabla 2.5 Propiedades químicas de la perlita en estado natural

Composición, en %:	
SiO ₂	72,60 a 74,84
Al ₂ O ₃	13,37 a 13,64
Fe ₂ O ₃	0,54 a 0,97
CaO	0,45 a 0,97
MgO	0,20 a 0,26
Na ₂ O	3,77 a 3,95
K ₂ O	3,95 a 4,19
TiO ₂	0,02 a 0,05
Pérdida por ignición	2,00 a 5,00

El material expandido se presenta en forma de partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1,5 y 6 mm, con una densidad aparente baja, entre 30-150 kg·m⁻³ (tabla 2.6). Posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad; su capacidad de intercambio catiónico, C.I.C. es prácticamente nula (1,5-2,5 meq/100 g); su durabilidad está limitada al tipo de cultivo, pudiendo llegar a los 5-6 años. Su pH está cercano a la neutralidad (7-7,5) y se utiliza a veces, mezclada con otros sustratos como turba, arena, etc.

Tabla 2.6 Propiedades de la perlita expandida (Orozco, 1995)

	Tipo B-6	Tipo B-12	Tipo A-13
Tamaño de las partículas (mm de diámetro)	0-15	0-5	3-5
Densidad aparente kg·m ⁻³	50-60	105-125	100-120
Espacio poroso (%)	97,1	94	87,0
Material sólido (% v)	2,9	6	13,0
Aire (% v)	24,4	29,14	58,1
Agua fácilmente disponible (% v)	36,6	24,6	6,9
Agua de reserva (% v)	8,4	6,7	2,7
Agua difícilmente disponible (% v)	27,7	25,2	19,3

2.5.3.1 Recirculación

La mayoría de las técnicas utilizadas en los cultivos sin suelo constituyen sistemas abiertos en que los lixiviados de las soluciones nutritivas se vierten al suelo y lo contaminan. Puesto que difícilmente coincide la dinámica de absorción de nutrientes por parte de las plantas con la aportada por la solución nutritiva, se utilizan fracciones de lavado que pueden oscilar entre el 20 y el 50 %, (Lorenzo y col., 1993) lo cual supone una pérdida de nutrientes y agua. Así los volúmenes de solución lixiviada pueden representar anualmente en condiciones mediterráneas hasta 3.000 m³·ha⁻¹ (Widen, 1988). De los nutrientes aportados cerca del 50% se pierden por lixiviación. Una fracción que puede reducirse prácticamente a cero con los sistemas de recirculación (Stanghellini y col., 2003), actualmente, en España, un 5% de los cultivos hidropónicos se realizan mediante técnicas de recirculación. La recirculación en los cultivos sin suelo consiste en la recogida y reutilización de los lixiviados sobrantes de la fertirrigación de forma que se establezca un circuito cerrado (figura 2.5).

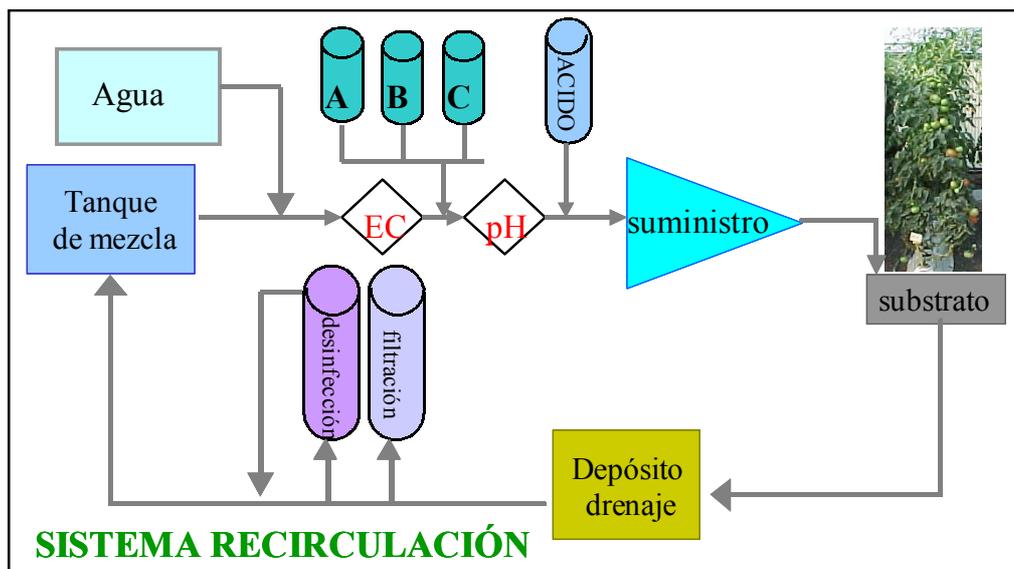


Figura 2.5. Esquema de un sistema cerrado o de recirculación

Los sacos de sustrato deberán ir colocados sobre bandejas colectoras (figura 2.6 a) que conducirán los drenajes sobrantes hacia depósitos de recogida (figura 2.6 b). A partir de ahí estos deberán ser filtrados, para eliminar sólidos en suspensión procedentes de los sustratos, las propias raíces o microorganismos que pueden resultar patógenos. En algunos equipos después de la filtración se procede a la desinfección (figura 2.6 c). Posteriormente se efectúa la recomposición de la solución nutritiva en función de la conductividad eléctrica, CE, y del pH medido en el lixiviado y del deseado (figura 2.6 d). Desde un punto de vista técnico la operatividad de un sistema de recirculación viene condicionada por la calidad del agua de riego. Cuando la CE es inferior a $0,6 \text{ dSm}^{-1}$ no debe representar ningún problema. Si la CE es superior a $1,0 \text{ dSm}^{-1}$ el agua será un factor más o menos limitante en función de su composición, siendo las concentraciones de cloro y sodio determinantes para el uso de un agua en sistemas cerrados (Marfà, 2000).



Figura 2.6 a) sacos colocados sobre las banquetas de drenaje; b) tubos de recogida de lixiviados; c) depósitos de almacenamiento de lixiviados y d) depósitos de abonos y autómata de riego

2.5.3.2 Necesidades de riego

Una buena gestión del agua empieza por la determinación más correcta posible de las necesidades de agua del cultivo. En un sistema hidropónico, el manejo del riego irá comandado por un controlador más o menos complejo. Dicho controlador puede variar desde un simple programador de dosis y frecuencia a ordenadores que reciben señales de diferentes sensores. Estos pueden ser climáticos, para el cálculo de la transpiración, tensiómetros, que miden la humedad del suelo, o bandejas que informan del volumen de drenaje. En función de los parámetros de consigna se actuará sobre la apertura y cierre de las válvulas de riego.

Existen varios métodos para el cálculo de la evapotranspiración, desde métodos de cálculo directo como la utilización de lisímetros para el cálculo de la pérdida de peso de la planta debido a la transpiración, o los balances de agua en el suelo a métodos indirectos, principalmente ecuaciones empíricas basadas en variables climáticas. De estas últimas las más sencillas son las basadas en la medida de la temperatura (Thornthwaite, 1948) y (Blaney y col., 1950). Existen otras ecuaciones,

igualmente empíricas, que se basan en la radiación, Priestly-Taylor, o la de Jensen-Haise que combina estas dos variables (Villar y col., 1996).

Más rigurosas resultan aquellas fórmulas basadas en la combinación del balance energético y el transporte convectivo del vapor de agua (Penman, 1948) adaptada por (Monteith y col., 1990) para estimar la evapotranspiración real de las plantas expresada en unidades de energía como:

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n (1 - \exp(-kL)) + (\rho c_p / r_a)(e_a^* - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (2.1)$$

donde λ es el calor latente de vaporización ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$), E es el flujo de evaporación ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en función de la temperatura ($\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$), R_n es la radiación neta, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) que deberá multiplicarse por la radiación interceptada por el cultivo ($1 - \exp(-kL)$) por tratarse de un cultivo discontinuo, siendo k el coeficiente de extinción y L el índice de área foliar, ρ es la densidad del aire ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c_p es el calor específico del aire ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a presión constante, r_a es la resistencia externa o aerodinámica ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), e_a^* es la presión de vapor del aire saturado (kPa), e_a es la presión de vapor del aire (kPa), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$) y r_c la resistencia interna del dosel vegetal a la transmisión de vapor de agua ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)

La aplicación de esta ecuación requiere del conocimiento de diferentes parámetros como la resistencia interna, resistencia aerodinámica,... de ahí que diversos autores hayan presentado versiones simplificadas de esta ecuación para varios cultivos (Bailey y col., 1993, Baille y col., 1994, Lorenzo y col., 1996, Marfà y col., 1999, Montero y col., 2001). Para este trabajo proponemos la ecuación presentada en (Antón y col., 2002) para el cálculo de la ET en cultivo de tomate en invernadero (eq. 2.2).

$$ET = 0,5 \cdot (1 - \exp(-0,64 \cdot L)) \cdot S_o + 8,6 \cdot L \cdot (e_a^* - e_a) \quad (2.2)$$

siendo ET la evapotranspiración, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), S_o la radiación solar que atraviesa el invernadero ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), L el índice de área foliar, y $(e_a^* - e_a)$ el déficit de presión de vapor (kPa).

A partir del cálculo de la evapotranspiración se procederá al cálculo de la dosis de riego. A la cantidad de agua requerida para compensar la absorción radicular hay que añadir una fracción que compense las necesidades de lixiviación o de lavado de las sales disueltas en el agua y que se encuentran en mayor concentración que la absorbida por el cultivo (Medrano, 2002). En cultivo hidropónico con recirculación se aconseja un 50% de drenaje para evitar al máximo la excesiva concentración de sales en el sustrato y en el agua de drenaje (Stanghellini y col., 2002) y de un 25 % en drenaje libre. Las condiciones de transpiración y por tanto de riego para un cultivo de tomate en sustrato hidropónico para las condiciones del Maresme se reflejan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Necesidades de riego en función de la transpiración

DDT	S_0 MJm ⁻² d ⁻¹	L	ET Lm ⁻² d ⁻¹	ET total Lm ⁻²
30	6,5	2,3	0,7	20,80
60	9,1	2,8	1,0	30,38
90	12,9	3,1	1,5	44,95
120	14,9	3,3	2,1	63,47
180	16,2	3,6	2,6	156,06
TOTAL			1,7	315,65

DDT: días después del transplante

2.5.3.3 Fertilizantes

A partir de las necesidades conocidas de nutrientes (tabla 2.8) y del análisis del agua se determinarán las necesidades de fertilizantes para los diferentes períodos.

En el caso de drenaje libre, a partir del análisis químico semanal de la solución nutritiva y del drenaje se ha calculado la concentración de la absorción (UC , mmol·L⁻¹) por las plantas siguiendo la ecuación del balance de masas propuesto por (Pardossi, 2002):

$$UC_i = \frac{(R \cdot C_{nsi}) - (D \cdot C_{di})}{nT} \quad (2.3)$$

siendo R , el riego aportado (L·planta⁻¹), C_{nsi} , la concentración del ión i en la solución nutritiva (mmol·L⁻¹), D , el volumen de drenaje (L·planta⁻¹), C_{di} , la concentración del ión i en el drenaje, n , el número de plantas y T la evapotranspiración (L·planta⁻¹).

Tabla 2.8 Nutrientes a aportar según las fases de cultivo. Fase I: Estado vegetativo, Fase II: Floración, Fase III: Cosecha

Nutriente	Fase I, mmol L ⁻¹	Fase II, mmol L ⁻¹	Fase III, mmol L ⁻¹
Amonio (NH ₄ ⁺)	0,5	0,5	0,5
Calcio (Ca ⁺⁺)	4,5	4,6	5,1
Hierro (Fe ⁺⁺ , Fe ³⁺)	0,02	0,02	0,03
Magnesio (Mg ⁺⁺)	1,6	1,6	1,8
Potasio (K ⁺)	4,6	5,7	7,1
Nitratos (NO ₃ ⁻)	10,3	10,3	11,0
Fosfatos (H ₂ PO ₄ ⁻)	2,5	3,1	3,8
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	2,0	2,0	2,0

2.5.4 Control fitosanitario

Desde que la agricultura existe, el hombre ha luchado continuamente contra aquellos organismos que pueden afectar a la producción. Los métodos de lucha han ido evolucionando pudiéndose distinguir tres períodos (Pozo Vives, 2002):

- 1) Etapa clásica, anterior al descubrimiento de los productos de síntesis clorados y fosforados. Ésta se caracteriza por la utilización de productos naturales y sobretodo por prácticas culturales y terapéuticas.
- 2) Control químico. La aparición de moléculas químicas de síntesis con fuerte actividad insecticida se inicia en los años 40 con el DDT. Esta etapa se caracteriza por un aumento notable de las materias activas que se utilizan en agricultura con resultados inmediatos. Sin embargo la utilización masiva de estos productos ha conducido a una serie de problemas secundarios, como son: aparición de resistencias en las plagas a causa de su evolución genética, destrucción de especies beneficiosas, aparición de nuevas plagas que pasan de ser secundarias a primarias al no tener enemigos que las controlen, residuos tóxicos en las cosechas y persistencia en el medio ambiente con la consecuente contaminación de suelos, acuíferos, ríos, lagos, mares y atmósfera y por último aumento de los costes de producción debido al gran número de aplicaciones necesarias.
- 3) Etapa actual o neoclásica. Surge de la necesidad de frenar el abuso que se hace del control químico. Se retorna a la fase clásica, pero sin despreñar la lucha química. Dentro de esta fase encontramos el control integrado de plagas y la producción agrícola integrada. Para la protección de los cultivos, la producción integrada combina la utilización de métodos de control biológico para el control de las plagas juntamente con la utilización de las técnicas basadas en la utilización de productos agroquímicos.

La producción integrada se puede definir como un sistema agrícola de producción de alimentos mediante métodos que respetan la salud humana y el medio ambiente con los objetivos de obtener productos de alta calidad, minimizando el uso de productos agroquímicos, optimizando los métodos de producción, y disminuyendo los residuos. El control integrado de plagas forma parte de la producción agrícola integrada pero ésta se centra únicamente en la sanidad vegetal.

La protección integrada de plagas se basa en la vigilancia de los cultivos y estimación de la población de organismos perjudiciales y antagonistas, en la aplicación de un umbral máximo de tolerancia a partir del cual se hace necesaria la intervención utilizándose, preferentemente, el control biológico y los métodos químicos como último recurso.

Se entiende por control biológico el que puede ejercer la fauna auxiliar autóctona y los enemigos naturales que podemos incorporar al cultivo. La fauna auxiliar autóctona es la que se encuentra presente en nuestra zona, apareciendo de forma espontánea, viéndose favorecida por el menor número de tratamientos químicos. La fauna auxiliar o enemigos naturales pueden ser parásitos, depredadores y patógenos de las plagas.

Los parásitos son insectos entomófagos que atacan a una sola presa o huésped. Entre los insectos existe un tipo especial de parasitismo que acaba con la muerte del huésped y recibe el nombre particular de parasitoides. Los parasitoides son aquellos insectos cuyo desarrollo tiene lugar sobre o dentro de otro insecto fitófago. Es una relación de parasitismo que sólo se presenta en insectos. Ejercen un papel muy importante en el control de plagas.

Los depredadores son otros insectos o ácaros que no causan daño al cultivo pero capturan y se alimentan de otros insectos y ácaros fitófagos plaga. Difieren de los parasitoides porque atacan a varias presas durante su vida. En la mayoría de los casos son las larvas y los adultos de los depredadores los que buscan activamente a sus presas y se alimentan de ellas.

Los entomopatógenos son microorganismos que producen enfermedades a los insectos, siendo el agente causal muy diverso. Penetran en la especie plaga a través del tubo digestivo o del tegumento dando lugar a la expresión de la enfermedad que provoca la muerte del huésped. Los entomopatógenos son los únicos que no buscan de forma activa a sus presas, a excepción de los nemátodos.

Los plaguicidas pueden clasificarse en naturales y sintéticos donde los primeros provienen de una fuente orgánica natural (nicotina, rotenona) y los sintéticos son aquellos elaborados mediante síntesis complejas. Entre estos últimos, los insecticidas organofosforados y los insecticidas organoclorados son los más conocidos. Los primeros son ésteres del ácido fosfórico que pueden provocar intoxicaciones agudas en dosis muy bajas. Los insecticidas organoclorados son derivados de hidrocarburos clorados, fueron los primeros plaguicidas sintéticos en comercializarse, son compuestos de estructura química variada que tienen en común la presencia del cloro en su molécula, sus efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud se producen a mediano y largo plazo. Existen sin embargo muchas otras familias de plaguicidas tales como los carbamatos, piretrinas, piretroides, etc. Su toxicidad dependerá de la persistencia que tengan y de las interacciones con las proteínas funcionales del sistema inmune y del individuo.

Entre las principales plagas que afectan al cultivo de tomate en invernadero cabe destacar la mosca blanca (especies *Trialeurodes vaporariorum* Wetswood y *Bemisia tabaci*). También los minadores de hoja (*Liriomyza sp.*) constituyen una plaga importante. Otras plaga de menor

incidencia en los cultivos de tomate son ácaros, trips, pulgones y algunos lepidópteros (Alonso Sánchez, 2002).

La presión de plagas que soportan los cultivos en el área Mediterránea en general y en invernadero en particular es muy alta debido a la buena supervivencia invernal de los insectos y a las estructuras semiabiertas que favorecen el intercambio continuo de plagas. En esta situación el control de plagas requiere, según métodos convencionales, un elevado número de tratamientos insecticidas. En este sentido la utilización de programas de control integrado de plagas en tomate se ha mostrado eficaz para reducir el número de tratamientos plaguicidas (Arnó, 1997).

2.6 LISTA DE SÍMBOLOS

C_{d_i} : concentración del ión i en el drenaje, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	(ec. 2.3)
C_{ns_i} : concentración del ión i en la solución nutritiva, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	(ec. 2.3)
c_p : calor específico del aire, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	(ec. 2.1)
D : el volumen de drenaje, $\text{L}\cdot\text{planta}^{-1}$	(ec. 2.3)
E : flujo de evaporación, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	(ec. 2.1)
e_a^* : presión de vapor del aire saturado, kPa	(ec. 2.1)
e_a : presión de vapor del aire, kPa	(ec. 2.1)
ET : evapotranspiración, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	(ec. 2.2)
k : coeficiente de extinción	(ec. 2.1)
L : índice de área foliar, área foliar total por área de suelo, $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$	(ec. 2.1, 2.2)
n : número de plantas	(ec. 2.3)
R : riego aportado, $\text{L}\cdot\text{planta}^{-1}$	(ec. 2.3)
r_a : resistencia externa o aerodinámica, $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	(ec. 2.1)
r_c : resistencia interna del dosel vegetal a la transmisión de vapor de agua, $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	(ec. 2.1)
R_n : radiación neta, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	(ec. 2.1)
S_o : radiación solar que atraviesa el invernadero, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	(ec. 2.2)
T : evapotranspiración, $\text{L}\cdot\text{planta}^{-1}$	(ec. 2.3)
UC : concentración de la absorción, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	(ec. 2.3)
Δ : pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en función de la temperatura, $\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$	(ec. 2.1)
γ : constante psicrométrica, $\text{kPa}\cdot\text{K}^{-1}$	(ec. 2.1)
λ : calor latente de vaporización, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	(ec. 2.1)
ρ : densidad del aire, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	(ec. 2.1)