



**MANUAL DE VIVEROS PARA LA
PRODUCCIÓN DE ESPECIES
FORESTALES EN CONTENEDOR**

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 1
Temperatura**

Contenido

3.1.1 Introducción	X
3.1.1.1 Calor versus temperatura	X
3.1.1.2 Intercambio de calor en el ambiente del vivero que produce en contenedores	X
3.1.2 Papel de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de plántulas de árboles	X
3.1.2.1 Temperaturas cardinales	X
3.1.2.2 Temperaturas en la parte aérea versus temperaturas en la raíz	X
3.1.2.3 Variación diurna	X
3.1.2.4 Variación genética	X
3.1.3 Niveles óptimos de temperatura	X
3.1.3.1 Fase de establecimiento	X
3.1.3.2 Fase de crecimiento rápido	X
3.1.3.3 Fase de endurecimiento	X
3.1.4 Modificando la temperatura en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.1.4.1 Estructuras de cultivo	X
3.1.4.2 Equipo para la modificación de la temperatura	X
3.1.4.3 Enfriamiento	X
Ventilación por convección	X
Ventilación con ventiladores	X
Enfriamiento evaporativo	X
Enfriamiento en invierno	X
Técnicas de cultivo	X
3.1.4.4 Calentamiento	X
Calculando los requerimientos de calentamiento	X
Tipos de combustibles	X
Calentadores y sistemas de distribución de calor	X
Conservación del calor	X
3.1.5 Monitoreo y sistemas de control de temperatura	X
3.1.5.1 Instrumentos sensores	X
3.1.5.2 Equipo de control	X
3.1.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.1.7 Literatura Citada	X

3.1.1 Introducción

La temperatura es uno de los aspectos más familiares de nuestro ambiente, y tiene un marcado efecto sobre el crecimiento de las plántulas de árboles. Afecta directamente numerosas reacciones químicas involucradas en el metabolismo vegetal, y también controla otros procesos relacionados con el crecimiento, como la transpiración. La temperatura afecta el crecimiento de la planta en varias formas, como pueden ser cambios en la tasa de crecimiento, o daño severo, o incluso la muerte. Las plántulas de especies forestales son particularmente vulnerables a la tensión por temperatura cuando están en la fase de rápido crecimiento, momento en el cual son suculentas.

La temperatura es el factor ambiental más frecuentemente controlado, y más fácil de medir, cuando las plantas son producidas bajo condiciones controladas. Un invernadero representa la modificación cultural básica para el control del ambiente de cultivo, y está formado por estructuras que contienen calentadores, ventilas, ventiladores, almohadillas evaporativas, y controles ambientales sofisticados, para mantener una temperatura ideal de cultivo. Antes de discutir las aplicaciones hortícolas, es conveniente revisar los conceptos básicos de calor y temperatura.

3.1.1.1 Calor versus temperatura.

El calor es el nombre común que se da a la energía térmica, y representa la energía cinética total de una sustancia, mientras que la temperatura indica la energía promedio. Cuando se aplica calor a una sustancia, y no se presenta cambio alguno en su estado físico (como de hielo a agua), el movimiento de sus moléculas aumenta, como también aumenta la temperatura. Sin embargo, si la misma cantidad de calor es aplicada a dos sustancias, cada una de ellas puede tener una temperatura distinta, en virtud de sus diferentes estructuras moleculares, o densidades, y con ello diferentes capacidades para absorber el calor (Schroeder y Buck, 1970). Por ejemplo, un metro cúbico de aire, no tendrá la misma

cantidad de calor que el mismo volumen de agua, ambos sometidos a la misma temperatura. Desde el punto de vista del calentamiento, la temperatura indica la dirección, pero no la cantidad de calor transferida (Hanan *et al.*, 1978).

La energía térmica es medida en calorías en el sistema métrico, o en unidades térmicas británicas (Btu. British thermal unit) en el sistema inglés. Una caloría, es la cantidad de calor necesaria o para aumentar la temperatura de 1 g de agua en 1°C, mientras que 1 Btu está definida como la cantidad de calor requerida para o aumentar la temperatura de 1 libra de agua en 1°F. Las escalas de temperatura están basadas en los puntos de congelamiento y de ebullición del agua, 0 y 100°C, o 32 y 212°F; unas tablas de conversión entre grados Centígrados y grados Fahrenheit, se dan en el apéndice. La temperatura del aire, y con frecuencia la temperatura del medio de cultivo, normalmente son monitoreadas en los viveros forestales que producen en contenedores (ver sección 3.1.4, para mayor información).

3.1.1.2 Intercambio de calor en el ambiente del vivero que produce en contenedores.

El calor es transferido de un lugar a otro a través de tres procesos: **radiación, conducción y convección**. En el ambiente del vivero que produce en contenedores, la transferencia de calor-puede ocurrir por radiación solar y por radiación térmica, así como por la conducción de sólidos y líquidos. y mediante la convección de líquidos o gases (Fig. 3.1.1). En la conducción y la convección, el calor es transferido directamente, por contacto con una masa o flujo de materia, mientras que en la radiación la forma de energía cambia de energía térmica en una fuente, a energía electromagnética al ser transmitida, y eventualmente regresa a energía térmica cuando es recibida (ASHRAE, 1989).

En un vivero que produce en contenedores, todo el calor, salvo el de fuentes geotérmicas o de desechos nucleares, se origina del sol: tanto directamente por la radiación solar, o indirectamente, de combustibles orgánicos como la madera, gas natural, carbón (mineral). En un invernadero, las superficies se calientan cuando la radiación electromagnética del sol penetra la cubierta transparente, es absorbida, y convertida a radiación térmica (Fig. 3.1.1). Este "efecto de invernadero", se da especialmente en estructuras de cultivo cubiertas con materiales transparentes a la radiación solar, pero opacos a la radiación térmica. Los materiales opacos térmicamente incluyen vidrio, fibra de vidrio, acrílicos y policarbonatos; otras cubiertas para invernadero, como las películas de polietileno o de poliéster, son transparentes a la radiación térmica, y la única razón por la que se calienta el aire de un invernadero hecho con estos mate-riales, es el restringido intercambio de aire con el exterior (Mastarlez, 1977) (ver capítulo 3 en este volumen, para una discusión más detallada sobre la radiación solar).

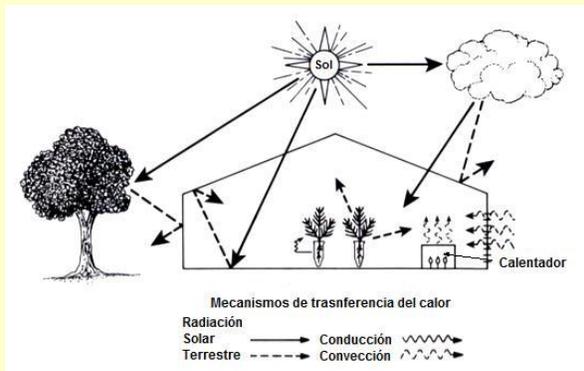


Figura 3.1.1 Intercambio de energía térmica en el ambiente del invernadero.

La regulación de la temperatura en un invernadero tradicional, no es una tarea simple. Los invernaderos se calientan mucho durante los periodos con tiempo atmosférico soleado, y los viveristas deben emplear ventilas o enfriadores evaporativos para proporcionar enfriamiento. En las zonas templadas, los viveristas deben proporcionar calor durante los períodos de tiempo atmosférico nublado y frío.

El calor de la radiación solar, así como el de fuentes suplementarias, es disipado como calor sensible y latente en el microclima alrededor de una plántula de especie forestal (Fig. 3.1.2).

El calor sensible, es el calor que origina un aumento en la temperatura, del aire o del medio de cultivo. Por otra parte, el calor latente, es el calor requerido para cambios de estado físico, como entre agua líquida y vapor de agua o hielo, y es emitido o absorbido sin cambios en la temperatura (Stathers y Spittlehouse, 1990). Ambos, la evaporación y la Transpiración, consumen calor latente en el ambiente de invernadero, porque la transpiración es esencialmente evaporación bio-regulada.

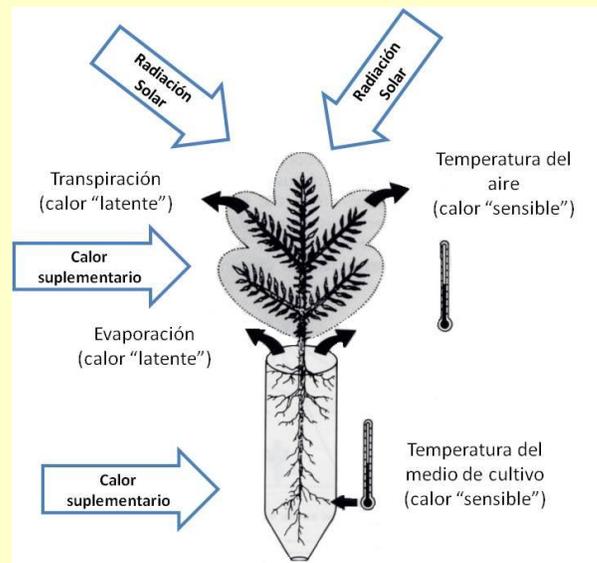


Figura 3.1.2. Intercambio de energía térmica en el microambiente del invernadero.

3.1.2 Papel de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plántulas.

El crecimiento de la planta es el producto final de muchos procesos químicos y físicos. La temperatura tiene un efecto directo en el metabolismo vegetal porque la tasa de las reacciones bioquímicas se multiplica 2 a 3 veces por cada 10°C de incremento en la temperatura, teniendo como límite el punto en el cual las enzimas son dañadas. Sin embargo, cada reacción tiene diferentes tasas a una temperatura dada, así que un aumento en la temperatura no necesariamente afecta un complejo proceso como es la fotosíntesis, la cual involucra una serie de reacciones, en la misma forma relativamente simple de una sola reacción.

La temperatura también afecta otros procesos vegetales que controlan el crecimiento. Las plantas responden a la temperatura de una manera compleja y amortiguada, a causa de sus elevados contenidos de humedad. El agua posee un mayor calor específico que cualquier sustancia común, así que los cambios en la temperatura del follaje se dan mucho más lentamente que los cambios en la temperatura del aire que le rodea. El cambio del agua de estado líquido a gaseoso, requiere de una gran cantidad de energía calorífica, así que la transpiración contribuye a enfriar a las hojas y a mantener temperaturas más favorables para la fotosíntesis. La forma de la hoja ha evolucionado para maximizar la intercepción de la luz solar para la fotosíntesis, mientras se disipa el calor resultante a través de la radiación y de la transpiración.

3.1.2.1 Temperaturas cardinales

El crecimiento de las plántulas de especies forestales, como el de todas las cosas vivas, está restringido a un intervalo de temperaturas relativamente breve. La mejor temperatura para el crecimiento de una plántula determinada, variará según la especie, el ecotipo y el estado de desarrollo. Estos intervalos ideales de temperatura, pueden ser definidos por **temperaturas cardinales: mínima, máxima y óptima**. Sin embargo, estos valores no son constantes rígidas, pueden cambiar conforme la planta madura o

se adapta a las condiciones ambientales (Larcher, 1975).

La respuesta a la temperatura es genérica para la mayoría de las plantas. Para muchas coníferas de regiones templadas y boreales, ocurre poco crecimiento de la plántula bajo 10°C (50°F), aunque los procesos básicos como la fotosíntesis y la respiración continúan lentamente a menores temperaturas. El crecimiento se mantiene a una baja tasa hasta los 15°C (59°F), para incrementar a través del intervalo óptimo de 18 a 30°C (64 a 86°C). Las temperaturas superiores a los 30°C (86°F), afectan adversamente el crecimiento (Kramer y Kozłowski, 1979). Aunque la respuesta varía entre la parte aérea y las raíces, así, como entre especies (Fig. 3.1.3.), se encuentra que el crecimiento de la plántula sigue una curva típica en forma de campana a lo largo del intervalo de temperaturas que se pueden tener en un vivero que produce en contenedores bajo ambiente controlado.

Los efectos de la temperatura en el crecimiento de la plántula son más pronunciados cerca de los valores mínimo y máximo (Fig. 3.1.3). Conforme el límite inferior de la temperatura de crecimiento es alcanzado, el crecimiento decrece gradualmente. Hay excepciones, por ejemplo, el crecimiento en altura y la producción de materia anhidra en plántulas de *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., se reduce abruptamente en 70 a 80% cuando la temperatura nocturna baja solamente unos cuantos grados, de 15°C (59°F) a 11°C (52°F) (Hellmers, 1966). Conforme se alcanza el máximo de temperatura, con frecuencia se presenta un rápido incremento en la longitud del tallo, y una reducción en la materia anhidra total (Downs y Hellmers, 1975). Finalmente, la tasa de crecimiento se reduce abruptamente conforme la temperatura se aproxima al punto de muerte térmica (los efectos patológicos de calor y frío extremos en las plántulas, son discutidos en el volumen cinco de esta serie).

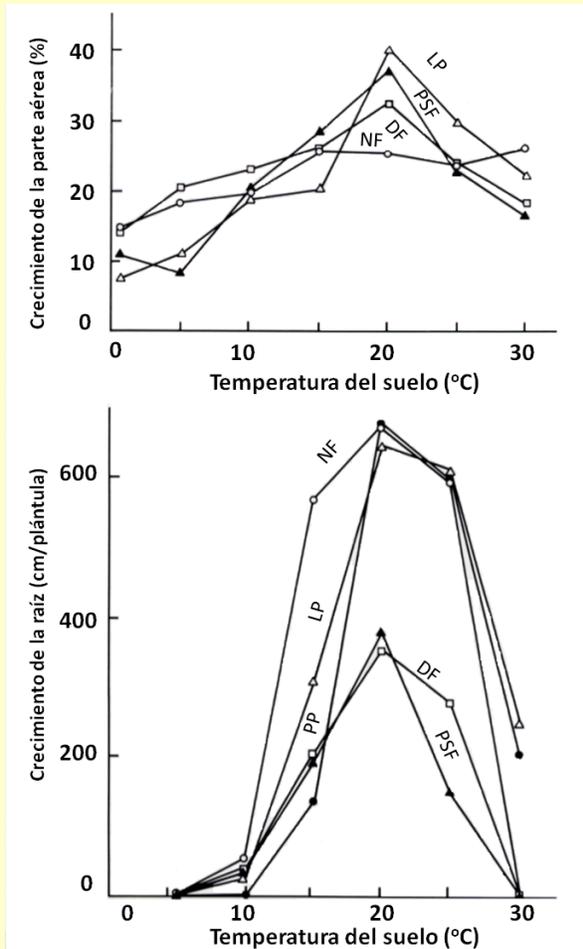


Figura 3.1.3 La temperatura del suelo influye en el crecimiento de la parte aérea y de la raíz, y la respuesta varía entre especies distintas. NF = *Abies procera* Rehd., LP = *Pinus contorta* Dougl. ex Loud., PF = *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws., DF = *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, PSF = *Abies amabilis* Dougl. ex Forbes (Modificado de Lopushinsky y Max, 1990).

El crecimiento puede ser medido de varias formas, pero los aspectos que más comúnmente se miden son la altura del tallo, diámetro del tallo y el peso anhidro total (biomasa) de la planta. Las temperaturas óptimas para maximizar el crecimiento de alguno de estos parámetros, no son necesariamente las mismas que para los otros (Tinus y McDonald, 1979).

3.1.2.2 Temperaturas de la parte aérea versus temperaturas en la raíz.

Los efectos de la temperatura en el crecimiento pueden variar en las diferentes partes de la plántula (Fig. 3.1.3). Aunque la temperatura de la raíz no es apreciada muchos viveristas, es tan, si no más importante, que la

temperatura de la parte aérea, en el control de la fisiología y fenología de las plántulas de especies forestales en contenedores, baja influencia es significativa cuando las plántulas están creciendo activamente, pero es particularmente pronunciada durante el periodo de almacenamiento en frío (**overwinter storage**), cuando uso breves exposiciones a temperaturas cálidas pueden cambiar drásticamente la dormancia de la plántula y la rusticidad ante el frío.

En la parte aérea, la temperatura del aire afecta tanto a procesos metabólicos, como la fotosíntesis la respiración, como a procesos biofísicos, como la transpiración. Puesto que estos procesos foliares son todos dependientes del agua y nutrientes minerales transportados del sistema radical, la temperatura del medio de cultivo es tan importante como la temperatura del aire. La tasa de absorción de agua de los sistemas radicales de plántulas, incrementa con la temperatura, y por tanto la transpiración de la plántula está afectada directamente por la temperatura del medio de cultivo (Fig. 3.1.4). A causa de que los iones nutritivos son transportados con el flujo transpiracional, de las raíces al follaje, la toma de nitrógeno y otros nutrientes esenciales también es limitada a bajas temperaturas del medio de cultivo (Orlander *et al.*, 1990). Elevadas temperaturas radicales, mayores a 25°C (73°F), pueden afectar adversamente el crecimiento, probablemente porque las raíces no pueden tomar oxígeno suficiente (Garzoli, 1988). La investigación ha mostrado que, cuando la temperatura del medio de cultivo es controlada en forma separada a la del sustrato, tanto el crecimiento de la parte aérea como el de las raíces son influenciados por la temperatura del medio de cultivo (Lavender y Overton, 1972). Una de las ventajas más significativas que los viveros que producen en contenedores tienen sobre aquellos que producen a raíz desnuda, es que la temperatura puede ser monitoreada y controlada con mayor facilidad.

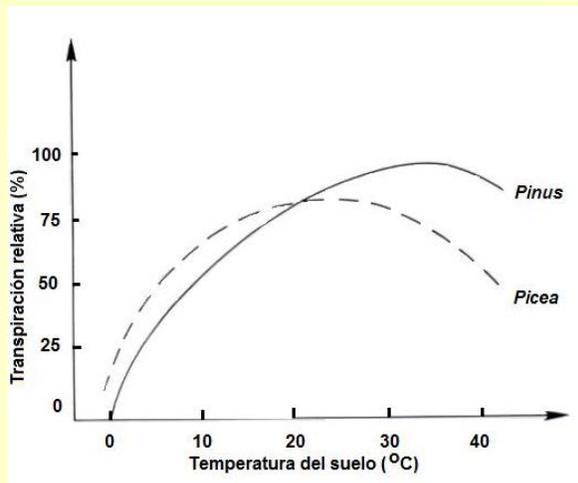


Figura 3.1.4 La fisiología de la parte aérea, es dependiente del funcionamiento del sistema radical. En este ejemplo, la transpiración aumenta con la temperatura, conforme el medio de cultivo se calienta, hasta que las temperaturas nocturnas causan severa tensión hídrica. Note que las especies responden diferencialmente (Modificado de Orlander, 1995; cit. por Orlander *et al.*, 1990).

La temperatura afecta tanto el tipo como la tasa de crecimiento de las plántulas en viveros forestales producidos en contenedores. Tinus (1984), cultivó varias especies y ecotipos bajo condiciones típicas de invernadero, y encontró que la altura del tallo, el diámetro basal de este, y la biomasa, todos variaron ante distintas combinaciones de temperaturas diurnas y nocturnas (fig. 3.1.5). Este autor concluye que para algunas especies, estas respuestas fueron lo suficientemente diferentes para garantizar ambientes de cultivo separados. En el caso de muchas coníferas de regiones templadas, las elevadas temperaturas tienden a producir plántulas larguiruchas (Rook, 1991); por ejemplo, Hellmers *et al.* (1970), observaron que las altas temperaturas estimularon el crecimiento en altura de plántulas de *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P., pero a expensas de la producción de materia anhidra (Fig. 3.1.6). No obstante, aparentemente, este efecto no cuenta para ciertas coníferas del sur de los E.U.A.

Mulroy (1972), encontró en *Pinus taeda* una relación inversa con la temperatura. Este pino produce de uno a siete flujos de crecimiento en el tallo durante el año (dependiendo de la edad de la plántula y de la localidad). El número de flujos fue incrementado, mientras que la longitud de éstos fue reducida, al incrementar la temperatura. Así, estas plántulas crecen la misma altura, aproximadamente, bajo un amplio intervalo de temperaturas.

3.1.2.3 Variación diurna

Se ha demostrado que tanto la temperatura nocturna como la diurna, afectan el crecimiento de la plántula (Figs. 3.1.5 y 3.1.6). Los investigadores han encontrado que algunas especies de árboles exhiben incrementos en su crecimiento cuando las temperaturas nocturnas son mantenidas más bajas que las temperaturas diurnas: este diferencial entre las temperaturas diurna y nocturna, es denominado el termo periodo. Hellmers y Rook (1973), reportaron que unas plántulas de *Pinus radiata* D. Don incrementaron significativamente su diámetro basal y el peso anhidro total y el de la raíz, cuando las temperaturas nocturnas fueron menores que las diurnas. Las temperaturas diurnas óptimas para *Picea glauca* (Moench) Voss y para *Pinus contorta* Dougl. ex Loud., son de 22 a 25°C (68 a 73°F). Otras especies, como *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P., requieren una temperatura nocturna ligeramente mayor (20°C o 68°F). Una mayor diferencia entre las temperaturas de día y de noche, puede resultar benéfica durante la fase de endurecimiento en algunas especies, pero es claro que otras especies no la requieren (Burr *et al.*, 1989, 1990).

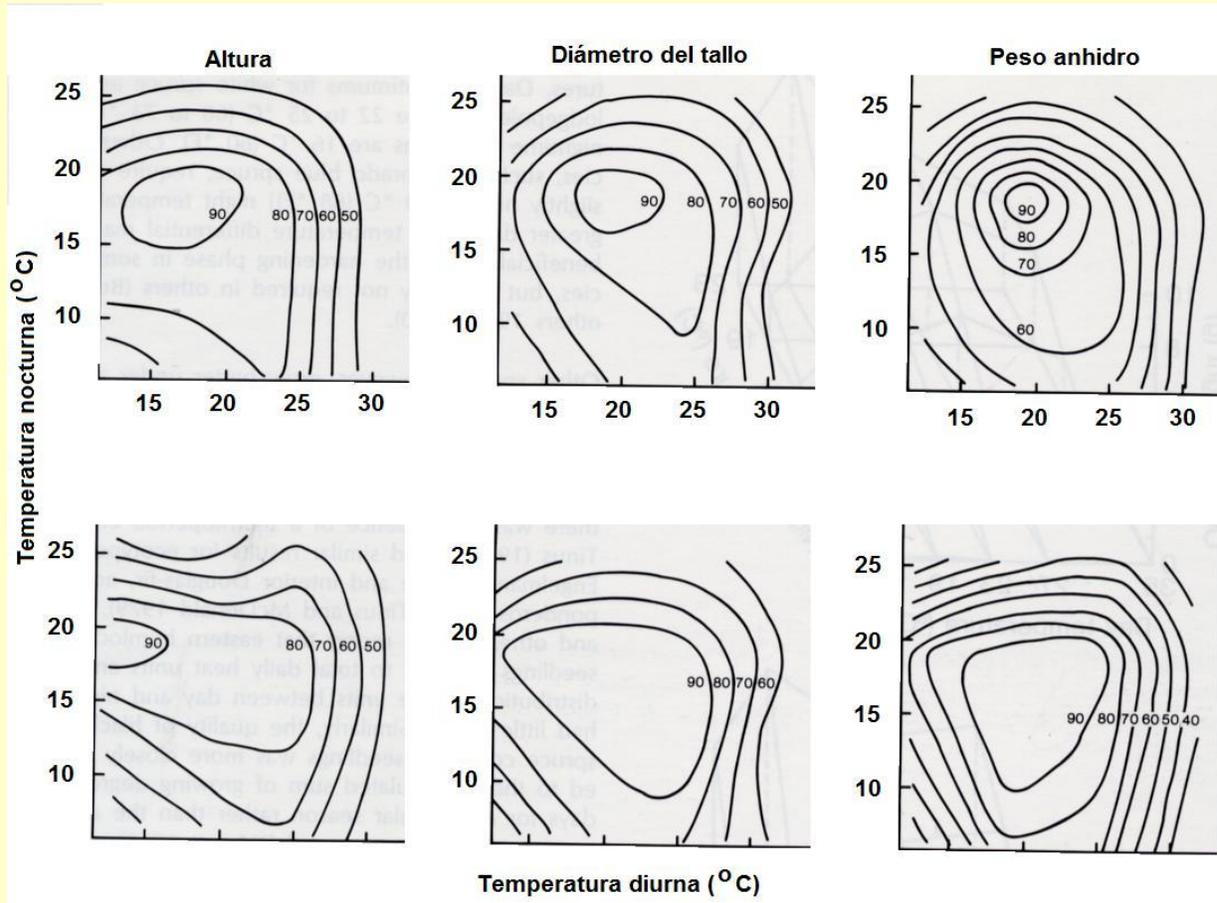


Figura 3.1.5 Dos ecotipos de *Picea engelmannii*, uno del Bosque Nacional Lincoln, en Nuevo México, E.U.A. (parte superior), y el otro del Bosque Nacional Apache-Sitgreaves, en Arizona, E.U.A. (parte inferior), mostraron diferentes patrones de crecimiento en la altura del tallo, su diámetro del tallo, y biomasa de la plántula (peso anhidro), cuando fueron cultivados bajo un intervalo de temperaturas nocturnas y diurnas. Los valores representan porcentaje del máximo crecimiento (Modificado de Tinus, 1984).

Sin embargo, otras especies crecen mejor bajo un régimen de temperatura constante. Lavender y Overton (1972), encontraron que diferentes ecotipos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, crecen mejor con temperaturas diurnas y nocturnas entre 18 a 24°C (62 a 72°F), y que no había evidencia del efecto del termoperiodo. Tinus (1984), halló resultados similares en ecotipos de *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P., de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, del interior, y de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. (Tinus y McDonald, 1979). Olson et al. (1959), refieren que las plántulas de *Tsuga canadensis* (L.) Carr. responden a las unidades de calor total diarias, y que la distribución de las unidades entre día y noche tuvo poco efecto. De manera semejante, la calidad de las plántulas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. producidas en contenedores, estuvo más relacionada con la suma

acumulada de de días-grado de cultivo, para una estación particular, más que con las temperaturas actuales (González y D'Aoust, 1988).

3.1.2.4 Variación genética

Como se mostró en las secciones previas, diferentes especies tienen diferentes respuestas a la temperatura; en general, las especies y los ecotipos del sur de los E.U.A., tienen requerimientos de temperaturas mayores que aquellas provenientes de más al norte. Esta variación intraespecífica, puede existir aún entre especies que ocupan hábitats similares. Lopushinski y Max (1990), hallaron que cuatro coníferas distintas del norte de los E.U.A. tuvieron diferentes crecimientos en la raíz y tallo, sobre un intervalo de temperaturas del suelo (Fig. 3.1.3). Los distintos ecotipos de una misma especie, pueden responder

diferencialmente a la temperatura; los mismos autores encontraron que las plántulas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws., de una fuente de semilla a baja altitud, tuvieron modelos de crecimiento en tallo y raíz distintos a los de las plántulas provenientes de fuentes de elevada altitud (ver Tinus y McDonald, 1979).

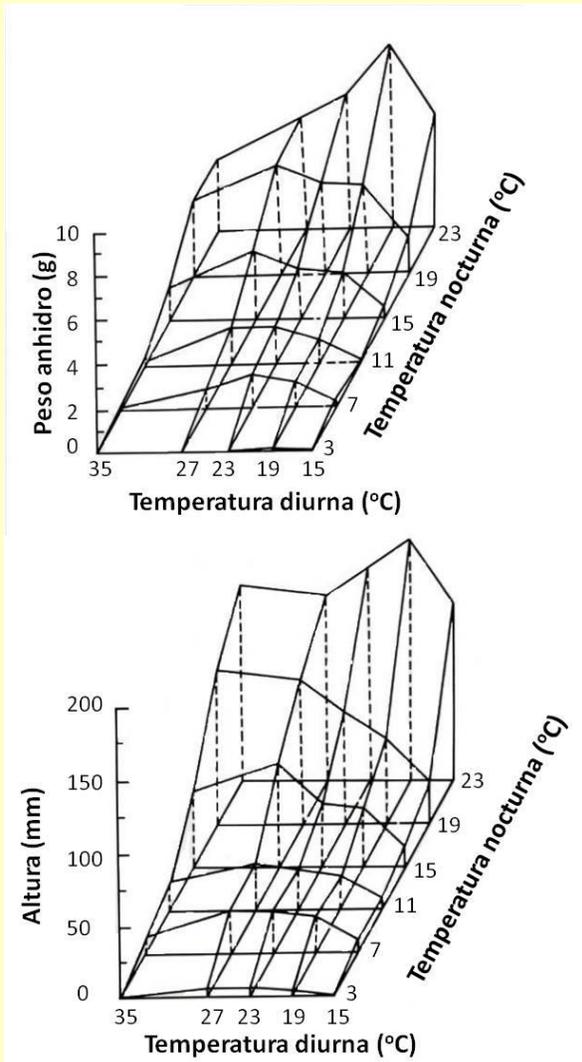


Figura 3.1.6 Tanto la biomasa (peso anhidro), como la altura de estas plántulas de *Picea engelmannii*, aumenta significativamente con las temperaturas de cultivo. Las elevadas temperaturas estimulan un crecimiento en altura excesivo, el cual frecuentemente resulta en plántulas con proporciones parte subterránea- parte aérea bajas (modificado de Hellmers *et al.*, 1970).

3.1.3 Niveles óptimos de temperatura

Las plántulas crecen en un amplio intervalo de temperaturas, pero en una parte de dicho intervalo existen temperaturas que promueven un crecimiento óptimo. El administrador de viveros necesita identificar estas temperaturas óptimas, para distintas especies y ecotipos, y las varias etapas del desarrollo de las plántulas, y determinar qué tanta variación puede ser tolerada para seguir produciendo el cultivo deseado. El crecimiento de plántulas de especies forestales en contenedores, puede ser dividido en tres fases:

- **Fase de establecimiento.** Periodo desde la germinación de la semilla, hasta el desarrollo de hojas primarias, y la extensión de la raíz en el contenedor.
- **Fase de crecimiento rápido.** Periodo en el cual las plántulas crecen en altura y peso a una tasa exponencial.
- **Fase de endurecimiento.** Periodo posterior al desarrollo de yemas, cuando continúa el crecimiento del diámetro basal y de la raíz (etapa 1), y cuando la plántula es endurecida en relación al frío (Nota del traductor: Adquisición de rusticidad) para su replantación (etapa 2).

3.1.3.1 Fase de establecimiento

En la primera etapa en la producción de especies forestales en contenedores, se busca promover una completa y rápida germinación, y las variables ambientales más críticas son temperatura y humedad (Tinus, 1982). Algunas especies de zonas templadas requieren estratificación (en frío) con humedad, para que las semillas germinen, y este proceso puede tomar de 1 a 6 meses, dependiendo de la especie. Las semillas de otras especies, y de fuentes más al sur, requieren solamente de un breve remojo previo, para que queden embebidas con el agua (los tratamientos de remojo previo, son descritos a detalle en el volumen seis de esta serie).

Las temperaturas mínima, óptima y máxima para la germinación, varían ampliamente según las semillas de diferentes especies, y

generalmente son menores para las especies de zonas templadas que para aquellas de regiones tropicales. La germinación óptima (el porcentaje de germinación más elevado en el menor tiempo), es sensible a la temperatura, y varía en alguna medida entre especies y aún entre genotipos de una misma especie. No obstante, las temperaturas para la germinación, entre 22 y 24°C (72 a 75°F), son óptimas para muchas especies (McLemore, 1966; Barnett, 1979; Heidmann, 1981).

Muchos resultados de investigaciones sobre germinación de semillas, son obtenidos bajo condiciones estándar de laboratorio, con temperaturas constantes. Sin embargo, tales resultados no pueden ser aplicados directamente a condiciones operativas de invernadero, donde las temperaturas fluctúan a través del día y entre un día y otro. Algunas pruebas de germinación han sido conducidas con temperaturas fluctuantes, las cuales son más representativas de las condiciones de invernadero. La semilla de *Pinus palustris* Mill., fue la única de cuatro especies de pino del sur de los E.U.A. que resultó afectada adversamente por temperaturas alternantes entre 24 a 35°C (75 a 95°F), en comparación con la temperatura constante de 24°C (75°F), la cual puede ser típica en un invernadero en operación (Cuadro 3.1.1). Todas las especies mostraron severas reducciones en la germinación cuando fueron cultivadas bajo temperaturas constantes y elevadas (35°C o 95°F).

Breves periodos con elevadas temperaturas pueden no reducir la germinación de algunas especies; por ejemplo, Dunlap y Barnett (1982), hallaron que tras exponer a las semillas de *Pinus taeda* L. y de *Pinus echinata* Mill, a temperaturas de 35°C durante un periodo de 12 horas diariamente, se aceleró la germinación sin resultar afectada la germinación total. Sin embargo, la tasa de germinación de la semilla de *Pinus palustris* Mill. fue reducida por esta exposición a temperaturas elevadas.

Después de que la plántula aún en germinación comienza a emerger del contenedor (Fig. 3.1.7), los viveristas deben regular cuidadosamente las temperaturas para promover un rápido crecimiento y desarrollo en la plántula, y minimizar el potencial de daño por "**damping-off**", o por factores abióticos. Tinus (1982), recomienda que las temperaturas durante la fase de establecimiento sean mantenidas en o ligeramente bajo el óptimo, porque las temperaturas ligeramente más frías hacen más lenta la elongación del hipocótilo, lo que resulta en plántulas más robustas. Una investigación reciente en viveros forestales que producen en contenedores, reveló que los viveristas emplean un intervalo relativamente angosto de temperaturas durante la fase de establecimiento (Cuadro 3.1.2). Las temperaturas diurnas oscilan de 21 a 27°C (70 a 80°F), mientras que las temperaturas nocturnas fueron sólo ligeramente menores, de a 18 a 27°C (65 a 80°F).

Obviamente, a causa de la necesidad de temperaturas relativamente altas, los invernaderos calentados deberían ser utilizados durante la fase de establecimiento, y en algunos viveros se han construido cuartos especiales de germinación (Fig. 3.1.8.). Aún en el invernadero productivo, la ubicación de los contenedores sembrados puede afectar la emergencia de plántulas; Hallett *et al.* (1985), reportaron que la emergencia de plántulas de *Picea mariana* Mill. B.S.P. varió considerablemente entre estructuras calentadas y no calentadas, así como en las diferentes ubicaciones dentro de la estructura calentada (Fig. 3.1.9) (Se proporciona más información acerca de los efectos de las estructuras de cultivo en la temperatura en la sección 3.1.4.1).



Figura 3.1.7 Durante la fase de establecimiento, la temperatura afecta tanto la tasa de germinación como la germinación total, así como la subsecuente emergencia de plántulas y su crecimiento.



Figura 3.1.8 En algunos viveros forestales que producen en contenedores, se usan cuartos de germinación especialmente equipados, para acelerar la germinación antes de trasladar los contenedores a las estructuras normales de cultivo.

Cuadro 3.1.1 Con excepción de *Pinus palustris*, la germinación de cuatro pinos del sur de los E.U.A. no resultó adversamente afectada por la fluctuación de la temperatura diurna, que es típica de un invernadero en operación; todas las especies resultaron significativamente afectadas por las constantes elevadas temperaturas.

Especie	Semilla estratificada	Tasa de germinación (%)		
		24°C (18 hr)		
		24°C constates	35°C (6 hr)	35 °C constantes
<i>Pinus palustris</i>	No	79 a	61 b	12 c
<i>P. ellioti</i>	No	84 a	83 ab	71 b
	Si	80 a	72 ab	66 b
<i>P. taeda</i>	No	88 a	89 a	27 b
	Si	97 a	96 a	46 b
<i>P. echinata</i>	No	78 a	76 a	42 b
	Si	46 a	45 a	30 b

Las medias de los tratamientos de estratificación en las especies (hileras) seguidas por la misma letra, no tienen diferencias estadísticamente significativas entre sí, con P = 0.05. Fuente: Dunlap y Barnett (1982).

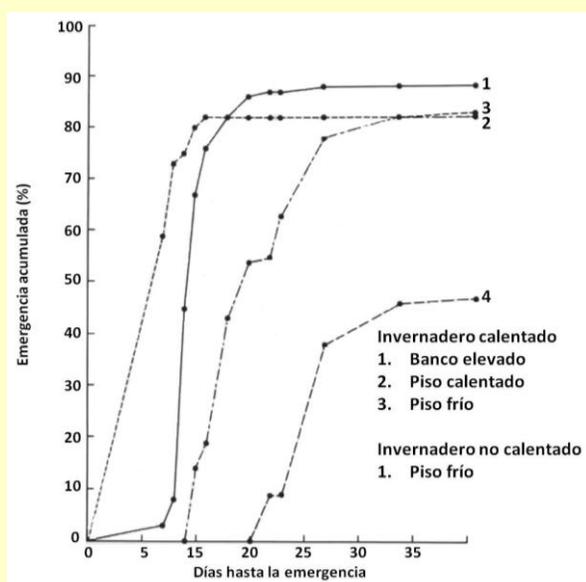


Figura 3.1.9 La emergencia total de las plántulas de *Picea mariana* fue significativamente mayor en un vivero calentado que en uno no calentado, y la tasa de emergencia resultó mucho más rápida sobre un banco elevado caliente o sobre piso calentado, que sobre el piso frío (modificado de Hallett *et al.*, 1985).

3.1.3.2 Fase de crecimiento rápido

Una vez que las plántulas han emergido y se comienzan a establecer en los contenedores, los administradores del vivero deben controlar la temperatura en el área de cultivo para promover una rápida expansión del tallo (Fig. 3.1.10). Los tallos de las plántulas de especies forestales, pueden crecer continuamente, o en una serie de flujos subsecuentes, y las temperaturas en el área de cultivo deben ser mantenidas dentro de un intervalo óptimo, o las plántulas pueden detener su crecimiento, y dar origen a una yema terminal (Kramer y Kozlowski, 1979).

Cuando esto pasa, frecuentemente resulta difícil romper la dormancia de la yema si no se satisface el requerimiento de enfriamiento, el cual puede tomar incluso meses. En un vivero operativo, la aparición prematura de yema puede ser desastrosa, y puede impedir que el cultivo alcance altos estándares dentro del esquema de cultivo (Tinus, 1982).



Figura 3.1.10 Durante la fase de crecimiento rápido, los tallos de las plántulas en contenedores crecen a una tasa exponencial, cuando las temperaturas del aire y del medio de cultivo son óptimas.

Se han derivado temperaturas recomendadas en cámaras experimentales de cultivo (Cuadro 3.1.3), las cuales están dentro del intervalo óptimo para una variedad de especies. Estas temperaturas consideran no solamente los requerimientos biológicos, también las restricciones económicas del calentamiento y del enfriamiento. Estas recomendaciones, también indican algunas diferencias en respuesta entre diferentes fuentes de semilla, pero no al extremo de requerirse diferentes regímenes térmicos en el invernadero.

Cuadro 3.1.2 Regímenes térmicos usados para producir plántulas de diferentes géneros, en viveros forestales operativos, durante las tres fases de cultivo principales.

Género	Localidad	Día o Noche	Unidad	Fase de establecimiento		Fase de crecimiento rápido		Fase de endurecimiento	
				Óptimo	Rango	Óptimo	Rango	Óptimo	Rango
<i>Pseudotsuga, Abies, Larix, Pinus, Picea</i>	ID	D	°C	21	18-24	21	18-29	18/7	2-8
			°F	70	65-75	70	65-85	65/45	35-65
	N		°C	21	18-24	20	17-24	7/0	0-18
			°F	70	65-75	68	62-75	45/32	32-65
<i>Cupressus, Juniperus, Pinus</i>	TX	D	°C	21	20-27	21	20-27	Ambiente	--
			°F	70	68-81	70	68-81	Ambiente	--
	N		°C	21	20-27	21	20-27	Ambiente	--
			°F	70	68-81	70	68-81	Ambiente	--
<i>Pseudotsuga, Eucalyptus, Sequoia, Pinus</i>	CA	D	°C	21	16-21	27	16-38	27/16	7-35
			°F	70	60-90	80	60-100	80/60	45-95
	N		°C	21	16-27	18	16-24	16/7	5-27
			°F	70	60-80	65	60-75	60/45	40-80
<i>Pinus, Picea</i>	ON	D	°C	22	20-28	20	18-30	10	15-20
			°F	72	68-82	68	64-86	Ambiente	70-90
	N		°C	20	15-25	16	15-25	5	5-15
			°F	75	70-80	68	65-70	Ambiente	50-70
<i>Betula, Acer</i>	MN	D	°C	24	21-27	23	20-24	Ambiente	21-32
			°F	75	70-80	72	68-75	Ambiente	70-90
	N		°C	24	21-27	20	18-21	Ambiente	10-21
			°F	75	70-80	68	65-70	Ambiente	50-70
<i>Quercus, Junglans</i>	MN	D	°C	27	24-29	27	24-29	Ambiente	21-32
			°F	80	75-85	80	75-85	Ambiente	70-90
	N		°C	27	24-29	24	24-27	Ambiente	10-21
			°F	80	75-85	75	75-80	Ambiente	50-70

Fuente: Container Nursery Survey (1990).

D: Día; N: Noche; °C: Grados Centígrados; °F: Grados Fahrenheit; Localidad = ID:Idaho; TX: Texas; CA: California; ON: Ontario; MN: Minnesota.

Tinus (1984) y Barnett y Brissette (1986), han reportado inconsistencias en las temperaturas óptimas que son atribuidas a plántulas de diferentes edades y tamaños. Por ejemplo, la temperatura diurna óptima para *Picea engelmannii* (Mill.), reportado por Helimers *et al.* (1970) resultó similar a la referida por Tinus (1984), pero la temperatura nocturna óptima fue bastante diferente. Las temperaturas óptimas para plántulas de *Pinus taeda* L. producidas en contenedores, acorde con el trabajo de Bates (1976), son un régimen día/noche de 29/23°C (84/73°F). Estos datos son bastante diferentes de los de Greenwald (1972), quien estudió plántulas de la misma especie, con más de 6 meses de edad. Las diferencias entre los resultados de distintas investigaciones sugieren que, conforme las plántulas se desarrollan, se presenta un cambio en las temperaturas que son óptimas para el crecimiento.

No obstante, la selección de temperaturas óptimas no necesita ser complicada. Una investigación en viveros exitosos que producen en contenedores, mostró que los administradores están produciendo una variedad de cultivos de plántulas forestales, bajo un intervalo de temperatura relativamente angosto (Cuadro 3.1.2).

Los objetivos para temperaturas diurnas oscilaron de 21 a 27°C (70 a 80°F.), y los objetivos para temperaturas nocturnas variaron de 16 a 24°C (60 a 75°F); estos valores coinciden con los datos publicados por viveros canadienses que producen especies forestales en contenedores (Edwards y Huber, 1982; Hallett, 1982).

Tales regímenes térmicos moderados reflejan la realidad operativa de muchos viveros forestales que producen en contenedores, incluyendo capacidad estructural y en equipo, así como la economía en el uso de energía.

Para viveristas nóveles, los valores referidos en los Cuadros 3.1.2 y 3.1.3, pueden ser utilizados hasta que la experiencia o la investigación provean mejor información. Si van a ser cultivadas más de una especie en el mismo invernadero, el administrador del vivero tendrá que adoptar un régimen que sea aceptable para la totalidad del cultivo. Los viveristas deben considerar que, aunque algunas especies y ecotipos son más demandantes que otros, muchas plántulas podrán producir un crecimiento aceptable bajo un amplio intervalo de temperaturas, y que la "mejor" temperatura también dependerá del tipo de crecimiento que se desee (Fig.3.1.5).

Cuadro 3.1.3 Regímenes térmicos (día y noche) en grados centígrados, para varias especies y ecotipos, según se ha determinado en diversas investigaciones.

Especie	Fuente de semilla	Temperatura Diurna		Temperatura Nocturna		Fuente
		Óptimo	Rango	Óptimo	Rango	
<i>Abies magnifica</i>	Costa Norte, CA (1,800 m)	17	16-19	5	4-10	Hellmers (1966a)
<i>Celtis spp.</i>	Bismarck, ND ¹	31	25-32	19	18-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Juglans nigra</i>	Manhattan, KS ¹	28	26-30	22	19-28	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Juniperus scopulorum</i>	Denbigh, ND ¹	25	21-28	18	12-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Juniperus virginiana</i>	Towner, ND ¹	24	21-26	21	19-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Larix siberica</i>	Denbigh, ND	25	24-28	22	16-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i>	Larimer Co, CO (3,140m)	19	17-23	23	22-24	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Picea glauca</i>	Alberta Central	22	21-25	19	16-20	Tinus y MacDonald (1979)
	Fairbanks, AK	22	20-24	16	13-22	Tinus y MacDonald (1979)
	Kenai, AK	22	20-25	19	16-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i>	Ft. Collins, CO	20	18-25	22	19-26	Tinus y MacDonald (1979)
	Indian Head, SK ¹	22	18-25	19	17-22	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Pinus contorta</i>	Alberta Central	25	22-28	16	14-19	Tinus y MacDonald (1979)
	Whitehorse, UT	22	20-24	19	16-20	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Pinus palustris</i>	Mississippi	23	17-26	17	17-23	Bates (1976)
<i>Pinus ponderosa</i>	Ruidoso, NM	22	18-26	24	28-28	Tinus y MacDonald (1979)
	Safford, AZ (2,770 m)	17	16-19	22	21-23	Callaham (1962)
	Valentine, ND	22	20-25	24	20-25	Tinus y MacDonald (1979)
	Black Hills, SD	23	20-24	23	20-24	Larson (1967)
	Moon, SD (1,890 m)	23	20-27	22	21-23	Callaham (1962)
<i>Pinus radiata</i>	Cambria, CA	20	19-23	5/20	4-7/17-23	Hellmers y Rock (1973)
<i>Pinus sylvestris</i>	Montes Urales, Rusia	19	28-21	28	25-31	Tinus y MacDonald (1979)
	Rusia Central	19	18-22	25	22-31	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Pinus taeda</i>	Carolina del Norte	26	23-29	20	17-23	Bates (1976)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Isla de Vancouver, CB	22	17-25	18	13-22	Brix (1971)
<i>Quercus macrocarpa</i>	Devils Lake, ND	31	26-32	19	17-26	Tinus y MacDonald (1979)
<i>Sequoia sempervirens</i>	Klamath, CA	19	18-20	16	15-17	Hellmers (1966b)
<i>Tsuga heterophylla</i>	Isla de Vancouver, CB	18	17-20	18	13-20	Brix (1971), Oeston y Kozlowski (19788)

CA: California; ND:Dakota del Norte; KS: Kansas; CO: Colorado; AK: Alaska; SK: Saskatchewan; UT: Utah; NM: Nuevo México; AZ: Arizona; SD: Dakota del Sur; CB: Columbia Británica.
Fuente: MacDonald (1979).

¹ Localidad de donde fue obtenida la semilla, no de su origen nativo.

3.1.3.3. Fase de endurecimiento

Una vez que las plántulas del cultivo han alcanzado la altura deseada o el peso anhidro objetivo, deben ser inducidas a detener su crecimiento en altura a través de prácticas de cultivo, y a producir una yema terminal (Fig. 3.1.11A). Durante la fase de endurecimiento, el crecimiento del diámetro basal y de la raíz es promovido, y las plántulas son endurecidas gradualmente, para que puedan tolerar las condiciones de transporte, almacenamiento y del sitio de plantación. La temperatura tiene un efecto profundo en la fisiología de la plántula, así que el desarrollo de la yema (Fig. 3.1.11), la dormancia, y el endurecimiento ante varias temperaturas, son todos afectados por los regímenes de temperatura mantenidos durante la fase de endurecimiento.

Otros factores ambientales afectan estos procesos, por lo cual los viveristas utilizan una o más combinaciones de tratamientos culturales, incluyendo reducción de la temperatura, reducción de la longitud del día, reducción en nitrógeno, así como la inducción de tensión hídrica para iniciar el endurecimiento.

Para los cultivos que duran más de una estación, las especies de zonas templadas requieren de un tratamiento con frío antes que el crecimiento de la parte aérea pueda reanudarse (Kramer y Kozlowski, 1979). El requerimiento de frío es más pronunciado en las especies y ecotipos de elevadas latitudes, o de clima continental, pero las especies de más al sur, y las marítimas, normalmente tienen algún requerimiento de temperaturas frías. Por ejemplo, Garber y Mexal (1980), refieren que para que unas plántulas de *Pinus taeda* L. producidas, a raíz desnuda pudieran reanudar su crecimiento normal, requirieron de aproximadamente 7 semanas de temperaturas frías. Para muchas especies, se desconoce la edad precisa o la etapa de desarrollo exacta en las cuales se requiere de enfriamiento (El uso de bajas temperaturas en el desarrollo de rusticidad ante el frío, y otros requerimientos, son descritos a detalle en el volumen seis de esta serie).

Los administradores de viveros que producen en contenedores, utilizan rutinariamente bajas temperaturas, especialmente en la noche, para ayudar a inducir la dormancia en el tallo, y establecer yemas terminales (Cuadro 3.1.2).

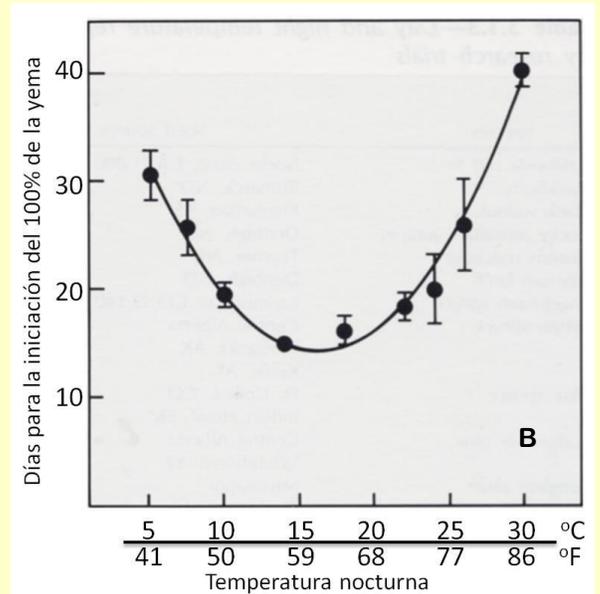


Figura 3.1.11 Las plántulas deben ser inducidas a detener su crecimiento en altura y a producir una yema terminal (A) al comienzo de la fase de endurecimiento. La temperatura puede tener un efecto significativo en el desarrollo de la yema. Por ejemplo, la tasa de iniciación de la yema en las plántulas de *Picea glauca* (Moench) Voss(B) fue óptima a aproximadamente 15°C (59°F) (B, Odum, 1991).

Sin embargo, la respuesta a bajas temperaturas es variable, e interactúa con el fotoperiodo en algunas especies. Las plántulas de *Pinus contorta* Dougl. Ex Loud., pueden continuar con su crecimiento en altura a través de un amplio intervalo de temperaturas, tanto como se mantenga un amplio fotoperiodo, mientras que otras especies, como *Quercus macrocarpa* Michaux. puede generar yemas

terminales en respuesta a las noches frías, independientemente del fotoperiodo (Tinus, 1982). Para el *Pinus sylvestris* L., la longitud del período de crecimiento del tallo, fue sustancialmente más corta con noches cálidas; los días cálidos tuvieron un efecto mucho menor (Cuadro 3.1.4).

En muchos viveros se remueven los cultivos del invernadero, o se remueven las cubiertas al comienzo de la fase de endurecimiento; entonces, algunas temperaturas reportadas en el cuadro 3.1.2 reflejan las condiciones ambientales del exterior. Aún en estructuras de cultivo cerradas, las temperaturas ambientales no son controladas con precisión, a menos que se encuentren los extremos que son perjudiciales. Los cultivos que deben ser dejados en instalaciones cerradas, son endurecidos a través de la reducción de la temperatura en dos etapas. La primera etapa, reduce las temperaturas de día y noche, hasta un nivel subóptimo para el rápido crecimiento en altura, pero lo suficientemente cálido para que, tanto el crecimiento en diámetro basal como el radical, continúen, y para que puedan

ocurrir los cambios metabólicos que se dan en el endurecimiento. Tales temperaturas, son mantenidas por 4 a 6 semanas. La segunda etapa de endurecimiento requiere de temperaturas poco superiores al punto de congelamiento, especialmente durante la noche, por 4 a 6 semanas.

Durante este tiempo, los requerimientos de frío de la yema son satisfechos, se desarrolla la rusticidad ante frío, aumenta el potencial de crecimiento de la raíz, y la plántula se hace resistente al daño mecánico. El proceso de endurecimiento será rápido si las temperaturas durante esas dos etapas son mantenidas cerca del óptimo. Sin embargo, desde el punto de vista operativo, con frecuencia resulta más barato reducir la temperatura gradualmente, como sucede en forma natural en un cultivo que es endurecido en el ambiente exterior, donde las temperaturas eventualmente alcanzan el punto de congelación, o llegan más abajo de éste.

Cuadro 3.1.4 Días para el desarrollo de la yema terminal en plántulas de *Pinus sylvestris*, producidas bajo 16 regímenes térmicos distintos (temperaturas diurnas de entre 15 a 30°C, y las temperaturas nocturnas de entre 5 a 20°C).

Temperatura		Días para el desarrollo terminal			
°C	°F	5°C (41°F)	10°C (50°F)	15°C (59°F)	20°C (68°F)
15	59	116	120	99	83
20	68	102	104	95	70
25	77	104	99	87	64
30	86	102	101	101	64

Fuente: modificado de Thompson (1982).

3.1.4. Modificando la Temperatura en los viveros que producen en contendor

El propósito primario de un invernadero, es controlar la temperatura. Un invernadero sin control de temperatura, usualmente es muy cálido durante el día, y muy frío durante la noche; razón por la cual el invernadero tiene que ser calentado o enfriado. Las temperaturas recomendadas en los cuadros 3.1.2 y 3.1.3 se refieren a los niveles a marcar en los sistemas de calentamiento y de enfriamiento, y el intervalo marca las temperaturas dentro de las cuales el intervalo podría operar la mayor parte del tiempo. Cuando las temperaturas se salen del intervalo, el crecimiento se ve reducido, pero no se ocasiona daño permanente, a menos que se alcancen temperaturas muy cálidas o muy frías durante un período de tiempo prolongado. Si las temperaturas se mantienen fuera de los intervalos durante las fases de establecimiento o de rápido crecimiento, las plántulas pueden sufrir tensión y entrar a un estado temporal de dormancia. Cuando tal condición de tensión persiste, el esquema entero de producción puede ser seriamente retrasado. Durante la fase de endurecimiento, la aparición de yemas o la dureza ante el frío pueden ser retrasadas o sufrir un proceso reversivo, quedando el cultivo en una condición pobre para el almacenamiento en frío o para la plantación. Sin embargo, es permisible e incluso deseable una cierta variación en la temperatura. Dentro del intervalo recomendado, un invernadero es más barato y fácil de operar si se permite la fluctuación de su temperatura unos pocos grados, más que tratar de mantener una estrecha tolerancia.

En un invernadero apropiadamente diseñado, las temperaturas nocturnas estables son fáciles de mantener, simplemente porque no hay entrada de energía solar. No obstante, las temperaturas ambientales nocturnas siempre son inferiores al óptimo, por lo que se requiere de calor suplementario durante este período en el invernadero. Muchas especies tienen unos niveles óptimos de temperatura nocturnos sorprendentemente elevados, y el mantenimiento de éstos puede resultar excesivamente oneroso, especialmente cuando prevalece un tiempo atmosférico frío. Una

estrategia al respecto, es reducir la temperatura nocturna a un punto tal en el cual, sean aceptables tanto la tasa de crecimiento como el costo de calentamiento. Otra opinión es evitar el cultivo de plántulas durante los meses más fríos del año (el esquema de cultivo se discute en la sección 3.3.3.1, y en el volumen seis de esta serie).

Aún las plántulas en contenedores, cultivadas en complejos a la intemperie, tienen una ventaja significativa en comparación con las plántulas producidas a raíz desnuda, pues los pequeños volúmenes de medios de cultivo en los contenedores se calientan mucho más rápido que el suelo. No obstante, esta característica puede representar un peligro, porque los sistemas radicales de las plántulas en contenedores deben ser protegidos contra temperaturas extremas cálidas y frías.

3.1.4.1 Estructuras de cultivo

El producir un ambiente de cultivo uniforme dentro de un invernadero cerrado, es un problema complejo que muchas personas deben resolver. Una de las principales razones para cultivar plántulas en una estructura de cultivo transparente, es atrapar radiación solar y convertirla en energía térmica (Fig. 3.1.1), pero esta fuente libre de energía puede también crear problemas:

1. Durante los días soleados, aún en invierno, las construcciones son calentadas muy rápidamente.
2. En las estructuras pobremente aisladas, el enfriamiento ocurre rápidamente durante la noche y durante los días nublados.
3. Las elevadas humedades que son mantenidas en las estructuras de cultivo cerradas, afectan significativamente el calor en éstas, porque el calor latente es consumido en la evapotranspiración, o es liberado durante la condensación.

El tipo de invernadero o cualquier otra estructura, puede variar con la etapa de cultivo de las plántulas. Cerrados, los invernaderos calentados son rutinariamente empleados

durante la fase de establecimiento, para acelerar la germinación y el crecimiento temprano de la plántula. La ubicación dentro de un invernadero calentado es importante de ser considerada; en muchos viveros cultivan sus propias plántulas en contenedores encima de bancos y en algunos se proporciona calentamiento por debajo del banco.

Este tipo de calentamiento hace más uniforme la temperatura dentro del invernadero. Hallett *et al.* (1985), encontraron que la tasa de emergencia de plántulas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P., fue, significativamente más rápida en invernaderos calentados, en comparación con los no calentados, y fue más rápida cuando los contenedores sembrados fueron colocados sobre bancos elevados, o directamente sobre un piso calentado (Fig. 3.1.9).

Algunos viveros que producen en contenedores, tienen cuartos de germinación especiales, los cuales son mantenidos uniformemente cálidos, húmedos y con luz para estimular una rápida germinación (Fig. 3.1.8). Matthews (1962), puntualiza que en Columbia Británica, los invernaderos bien aislados son modificados para servir como germinadoras, instalando sistemas eficientes de calentamiento, así como equipo especial de irrigación. Los contenedores sembrados son apilados en 12 niveles sobre plateas, que son colocadas dentro de germinadoras por 7 días aproximadamente. Dicho autor concluye que las germinadoras promueven tanto la tasa como el porcentaje de germinación, y que también pueden reducirlos costos totales de calentamiento. En otros viveros, los contenedores sembrados son colocados directamente dentro del invernadero para producción.

En muchos viveros que producen en contenedores, aún cultivan sus plántulas en algún tipo de invernadero durante la fase de crecimiento rápido, y todas las estructuras de cultivo tienen características especiales de diseño para ayudar a controlar la temperatura. Los invernaderos con **ambiente controlado** cuentan con equipo de calentamiento y con equipo de enfriamiento, para controlar la

temperatura a través de la estación de cultivo (Fig. 3.1.12A).

Los invernaderos que cuentan con un **ambiente semicontrolado**, con frecuencia denominados de cobertura, tienen lados enrollables, así como paredes que pueden ser levantadas para promover una ventilación cruzada (Fig. 3.1.12B). Los invernaderos de cobertura, son particularmente útiles hacia fines de invierno y a inicios de verano, cuando la radiación solar es más intensa, así como durante la fase de endurecimiento, cuando son deseables las bajas temperaturas nocturnas. En años recientes, algunos administradores de viveros forestales cultivan sus existencias en ambientes no controlados, a veces denominados **complejos de cultivo al aire libre** (Fig. 3.1.12C), en los cuales la temperatura no puede ser controlada (puede hallarse más información acerca de los tipos de estructuras de cultivo en el volumen uno de esta serie).

3.1.4.2 Equipo para la modificación de la temperatura

Aunque los invernaderos no son tan sofisticados como las cámaras de cultivo, los equipos modernos de control ambiental pueden regular el clima interior muy bien. No obstante, muchos viveristas no pueden adquirirlo, además que no requieren de un control muy preciso del ambiente, por lo que quedan satisfechos con alguna fluctuación en las condiciones ambientales, incluyendo temperaturas fuera del intervalo permisible, durante una pequeña porción del tiempo (normalmente menos del 5%). Las temperaturas diurnas fluctuarán más que las nocturnas, pues la cantidad de radiación solar varía tremendamente. Las temperaturas nocturnas en un invernadero bien diseñado serán muy estables y muy cercanas al punto programado.

Un pobre control de la temperatura puede originar serios problemas durante los períodos críticos en el ciclo de cultivo, como son el de germinación y emergencia. Una variación excesiva en la temperatura no debería ser tolerada, y debería ser

interpretada como una señal de diseño deficiente del invernadero, o de mal funcionamiento del equipo.



A



B



C

Figura 3.1.12 El tipo de estructura de cultivo tiene un efecto significativo sobre la capacidad de control de la temperatura que puede ser alcanzada, así como sobre los métodos de cultivo que pueden ser utilizados. En un ambiente controlado (A) se tiene equipo para el calentamiento, enfriamiento y circulación forzada del aire. En un ambiente semicontrolado, como este invernadero de cobertura (B), se tiene un calentamiento forzoso del aire, pero algunas características como lados enrollables, permiten al viverista regular la temperatura mediante ventilación cruzada. En años recientes, las plántulas de especies forestales han sido cultivadas en "complejos de cultivo al aire libre"(C), que carecen de control de la temperatura.

Existen muchos asesores que pueden auxiliar a los administradores noveles de vivero con detalles acerca del diseño de los invernaderos, su disposición, y la selección de equipo. Sin embargo, la contratación de un servicio de consultoría en invernaderos puede resultar muy cara para un vivero pequeño. La otra opción para el desarrollador del vivero, es aprender tanto como le sea posible, sobre los tipos de estructuras y equipo. Sin los servicios de un buen consultor, la comprensión básica de los cálculos para el calentamiento y enfriamiento de una estructura de cultivo resulta esencial. Si cuenta con este conocimiento, el desarrollador podrá revisar con espíritu crítico las propuestas de construcción provistas por fabricantes, tanto desde el punto de vista técnico, como del económico.

Una primera etapa crítica es visitar otros viveros locales, especialmente aquellos con cultivos similares, para ver qué estructuras y equipo están utilizando. Muchos viveristas con gusto preferirán tanto las ventajas como las desventajas de sus instalaciones, y especialmente lo que podrían hacer si tuviesen que construir de nuevo su vivero. También ellos deberían ser capaces de evaluar la confiabilidad y competencia de los distribuidores y consultores locales en invernaderos. Los desarrolladores de viveros, deberían tratar con aquellos distribuidores que cuenten con una línea completa de invernaderos y de equipo, para asegurar varias selecciones de combinaciones de componentes y precios. La economía del diseño y la frecuencia de ventas de una estructura dada, o de un modelo de equipo, con frecuencia pueden afectar los precios drásticamente. Independientemente de que se trate con distribuidores o con consultores, los administradores de viveros deberían estar seguros de señalar los requerimientos únicos de un cultivo de especies forestales, en comparación con otros cultivos hortícolas, como son el largo ciclo de cultivo, y la necesidad de endurecer adecuadamente las plántulas producidas. El sistema de control de temperatura para una estructura de cultivo, usualmente es diseñado para un cultivo particular, y para una estación de cultivo

específica, pero con la suficiente flexibilidad para cambiar el cultivo o los esquemas de cultivo en alguna medida.

Otros aspectos del vivero (como son los bancos, los contenedores, etc.) deben ser considerados en el diseño de la estructura original, así como en la selección del equipo de control. Por ejemplo, los bancos elevados son frecuentemente usados en los viveros que producen árboles en contenedores para facilitar el calentamiento y la ventilación bajo los bancos. Sin embargo, si los contenedores pueden ser cultivados sobre plateas especiales, que puedan ser manejadas con montacargas, entonces el área del piso debe mantenerse libre de obstáculos, y el equipo de calentamiento y de enfriamiento deberá estar situado encima.

Varias buenas referencias técnicas son guías útiles en el diseño de un sistema de calentamiento o de enfriamiento. Estas publicaciones contienen buenas discusiones sobre los principios básicos, y cuadros con especificaciones sobre el ambiente y de ingeniería, así como hojas de trabajo paso por paso y ejemplos. El Cuaderno de Trabajo para el Control del Clima en Invernaderos ("The Greenhouse Climate Control Handbook") (Acme, 1988), el "ASHRAE" (1989), y el Libro Rojo de Ball ("Ball RedBook") (Ball, 1985), son particularmente útiles. Se puede encontrar buena información en varios libros sobre invernaderos (Hanan et al., 1978; Langhans, 1980; Nelson, 1985; Garzón, 1988; Aldrich y Bartok, 1989).

3.1.4.3 Enfriamiento

En muchas partes de Norteamérica, el enfriamiento del invernadero representa un mayor problema que el calentamiento de éste, especialmente en la primavera y el verano, cuando la máxima cantidad de luz solar está disponible, y muchos cultivos de especies forestales están creciendo. El enfriamiento eficiente representa un serio reto tecnológico (Garzoli, 1988). La luz solar que es necesaria para la fotosíntesis genera un exceso de calor, el cual puede afectar adversamente el crecimiento de la planta. En un día claro, generalmente la radiación solar puede proveer

más energía termita que la que es perdida por la estructura, aún cuando la temperatura exterior esté bajo el punto de congelamiento (Hanan *et al.*, 1978). Además del enfriamiento, frecuentemente se necesita de una ventilación adecuada, para controlar el exceso de humedad (El efecto de la humedad se discute en el capítulo 2 de este volumen).

Los sistemas de calentamiento y de enfriamiento, consisten típicamente de una serie de etapas sucesivas. La primera etapa de muchos sistemas de enfriamiento mezcla el aire caliente de la estructura con aire frío del exterior. La capacidad de enfriamiento de un sistema de ventilación se expresa como la proporción de aire intercambiado, y se mide como el número de cambios de aire por hora, que es el número de veces que el volumen de aire del invernadero puede ser cambiado por aire del exterior en 1 hora. Dos factores del sitio afectan la eficiencia en el enfriamiento a través de intercambio de aire: 1) la intensidad de la radiación solar, porque el aire se calienta conforme se mueve a través del invernadero, desde las ventilas de entrada hasta las ventilas de salida, y 2) la altitud, porque el aire más ligero, propio de las grandes altitudes, es menos efectivo para remover el calor del sol. Como ejemplo, una tasa de cambio de aire de $2.4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ ($8 \text{ pies}^3/\text{por min}/\text{pie}^2$) de espacio de invernadero, se considera adecuada para un invernadero enclavado a altitudes menores a 300 m (1 000 pies), con una intensidad lumínica interior de 53.8 Klux ($1 \text{ 000 } \mu\text{mol}/\text{s}/\text{m}^2$) y una reducción de temperatura de 4°C (7°F), de los bloques de enfriamiento a los ventiladores de escape (Nelson, 1985).

Se utilizan tres tipos básicos de sistemas de enfriamiento en los invernaderos: ventilación por convección, ventilación por ventiladores y enfriamiento evaporativo. Estos pueden ser usados individualmente, pero con frecuencia se emplean combinados. Un cuarto método - enfriamiento por refrigeración- rara vez es utilizado, porque resulta antieconómico, excepto en situaciones especiales.

Ventilación por convección. Este tipo básico de enfriamiento del invernadero, utiliza un

mínimo de energía; opera sobre el hecho de que el aire caliente es más ligero que el aire frío. Las ventilas en la parte superior y lados del invernadero son abiertas, lo cual permite al aire caliente escapar por convección, y éste es reemplazado por aire frío, procedente de las ventilas laterales (Fig. 3.1.13A). Las ventilas pueden ser manuales o automáticas, y las ventilas controladas termostáticamente pueden proporcionar un nivel razonable de control de la temperatura cuando el aire exterior se mantiene frío.

Con la ventilación por convección, el nivel de control de la temperatura depende de cuatro factores: el tipo de estructura de cultivo, la localización y posición de las ventilas, la dirección y velocidad del viento, y el diferencial de temperatura entre el interior y el exterior. Los techos curvos de algunas estructuras de cultivo, como son las que están cubiertas con polietileno curvado, carecen de la ventilación convencional en la cresta, y de ventilas en las paredes (Garzoli, 1988). Los invernaderos más altos, generalmente se ventilan mejor que aquellos de perfiles bajos, porque generan una mejor columna convectiva. Las estructuras en invernaderos de cobertura, están diseñadas específicamente para promover una buena ventilación natural, y sus lados enrollables pueden ser operados tanto manual como mecánicamente (Fig. 3.1.12B). Algunos invernaderos ahora están equipados con paredes de "Poly-vent®", las cuales crean una pared rígida cuando se inflen y colapsan, para facilitar la ventilación cruzada cuando se desinflan (Fig. 3.1.14).

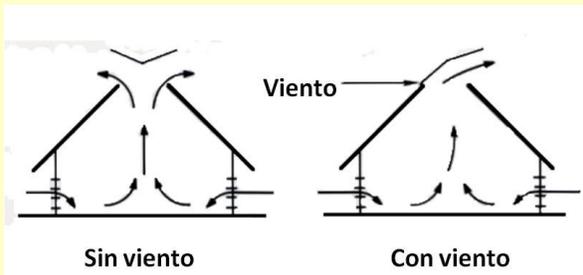


Figura 3.1.13 La ventilación convectiva, utiliza ventilas en la parte superior y lados, para crear una columna convectiva, con el propósito de facilitar la entrada de aire frío por los lados, y permitir la salida del aire caliente por la parte superior (izquierda). Con vientos superiores a 10 km/h (6 millas/hora), la ventila del lado que da al viento debe ser

cerrada, y la ventila del lado contrario abierta ampliamente, para incrementar el flujo de aire (derecha) (Modificada de Langhans, 1980).

Las ventilas deben ser apropiadamente localizadas y operadas para obtener una ventilación natural eficiente. Bajo condiciones de calma, todas las ventilas deben estar ampliamente abiertas, y en este caso, tanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas exterior e interior, tanto mayor será el flujo de aire resultante.

Cuando la velocidad del viento excede de 10 km/h (6 millas/hora), las ventilas laterales y la ventila del techo a sotavento deben ser abiertas totalmente, mientras que la ventila del techo de barlovento debe ser cerrada (Fig. 3.1.13B). Esto origina una ligera reducción en la presión de aire justo encima de la ventila de sotavento, e incrementa el flujo de aire (Langhans, 1980). El enfriamiento con ventilación por convección es amplia y eficientemente utilizado en viveros forestales que producen en contenedores en la región del Pacífico noroeste. E.U.A., y las provincias marítimas del Canadá, donde las temperaturas rara vez exceden de 38°C (100°F) al medio día, en el verano.

Aún con sistemas bien diseñados, existen algunas desventajas en los sistemas de ventilación por convección. Estos no pueden reducir las temperaturas por debajo de la temperatura ambiente exterior, y se incrementará la evapotranspiración en los sitios cálidos y soleados. Las ventilas del techo deben ser cerradas cuando prevalecen vientos fuertes, de lo contrario pueden resultar dañadas.

Ventilación con ventiladores. Cuando la ventilación por convección no es efectiva, los ventiladores pueden ser utilizados para incrementar la tasa de intercambio de aire a través del invernadero. La ventilación con ventiladores es más eficiente que la ventilación por convección, porque el flujo laminar de un sistema apropiadamente diseñado enfría sólo el área alrededor del cultivo, no el aire de los estratos superiores del invernadero (Langhans, 1980).

Un sistema de ventilación de este tipo, consiste de una serie de ventilas para la toma de aire sobre una pared final del invernadero, y una combinación de ventiladores de extracción, y ventilas sobre el extremo opuesto (Fig. 3.1.15). Los ventiladores de extracción del invernadero son generalmente del tipo con hélices, y deben ser capaces de funcionar en contra de las presiones ligeramente negativas que existen en un invernadero cerrado. Las ventilas especiales con persianas, para la entrada de aire, frecuentemente son diseñadas y usadas para mantenerse cerradas normalmente, y para abrir solamente bajo presión negativa, creada por los ventiladores de extracción, o cuando su motor para abrir-las es encendido.



Figura 3.1.14 En los invernaderos con paredes de "Polyvent®" se pueden desinflar los paneles para generar una buena ventilación cruzada durante el tiempo atmosférico cálido. Durante el invierno, los lados pueden ser inflados para proporcionar un aislamiento cálido.



A



B

Figura 3.1.15 Un sistema de ventilación con ventiladores, incrementa mucho la tasa de intercambio de aire, y por tanto también aumenta la capacidad de enfriamiento de un invernadero. Un sistema típico consiste de ventilas con persianas sobre una pared final (A), que abren automáticamente cuando son encendidos los ventiladores de extracción al otro lado (B).

La posición de los ventiladores y de las ventilas, dependerá del tipo de invernadero, su orientación, y la dirección prevalenciente del viento. Los ventiladores deben ser ubicados para permitir el paso del aire a través de la dimensión más larga, hasta un máximo de 70 m (230 pies). Esta limitación se debe al uso eficiente del aire enfriado, y al aumento de temperatura de las ventilas al ventilador. Resulta más eficiente ubicar los ventiladores y las ventilas sobre paredes finales porque se requieren pocos ventiladores de extracción, y es más fácil proporcionar condiciones uniformes, debido al flujo laminar que es creado. Para ser más efectivos, los ventiladores deberían estar sobre el lado opuesto a la dirección normal de los vientos, y cuando los invernaderos está localizados muy juntos, los ventiladores no deberían ser

colocados directamente uno frente a otro. Otros aspectos de la ubicación de los ventiladores son cubiertos por Nelson (1985) y por Langhans (1980).

La capacidad de los sistemas de ventilación con ventiladores debe ser medida en tasas de intercambio de aire; obviamente, tanto mayor tal tasa, mejor la ventilación (Cuadro 3.1.5).

Para lograr un mejor intercambio y mezclado del aire, en algunos invernaderos han instalado sistemas de ventilación con tubos, los cuales usan tubos de plástico flexible de gran diámetro, con perforaciones distribuidas regularmente para permitir el acceso de aire frío del exterior dentro del ambiente cálido del invernadero (Fig. 3.1.16). Los sistemas de ventilación con ventiladores a propulsión (Fig. 3.1.17A), combinan ventiladores de extracción con un sistema de ventilación con tubo, para regular la

temperatura del aire y la humedad eficientemente, dentro de la estructura de cultivo (Langhans, 1980). Cuando la temperatura o la humedad es óptima, el sistema recircula el aire dentro del invernadero (Fig. 3.1.17B), pero cuando éstas son muy elevadas, el ventilador de extracción remueve el aire interior y las aberturas con persianas permiten la entrada del aire frío del exterior (Fig. 3.1.17C).

Existen algunas ventajas de los sistemas de ventilación con ventiladores. Desde el punto de vista económico, la cantidad de aire que puede ser impulsada a través del invernadero, tiene un límite y se considera como el máximo a tres cambios de aire por minuto (Langhans, 1980). Si se presenta una falla en la fuente de energía, y el enfriamiento del invernadero depende totalmente de los ventiladores, la temperatura puede aumentar a niveles dañinos rápidamente.

Cuadro 3.1.5 La cantidad de calor removido de un invernadero enfriado por ventilación con aire del exterior, y reduciendo la temperatura del aire que entra con un sistema de enfriamiento evaporativo, es función del volumen del aire que puede ser movido a través del invernadero, y de la diferencia de temperatura entre el aire externo y el interno*².

Volumen de aire movido		Calor removido (X 1,000 Kcal)		
Cambios de aire por minuto	Tasa del ventilador (m ³ /min)	Diferencia de 5°C (9°F)	Diferencia de 10°C (18°F)	Diferencia de 15°C (27°F)
0.5	300	25	50	75
1.0	600	50	100	150
1.5	900	75	150	225
2.0	1,200	100	200	300
3.0	1,500	125	250	375

² Asumiendo un invernadero de 600 m³ (21,200 ft³), a nivel del mar, y con una temperatura interna de 20°C. Fuente: Modificado de Langhans (1980).

Enfriamiento evaporativo. Este popular sistema de enfriamiento de invernaderos, está basado en el hecho de que una cantidad significativa, 585 Kcal (8 900 Btu/gal) de calor latente es absorbido cuando el agua se evapora. Por tanto, cuando al aire seco del exterior del invernadero es impelido por un ventilador a través de un almohadilla (PAD o bloque) humedecida, éste es enfriado por la evaporación del agua, y la cantidad de calor removido puede ser sustancial (Cuadro 3.1.5). El "enfriador por anegamiento" ("swamp cooler") casero, es una versión en miniatura de un sistema de enfriamiento evaporativo.

La posibilidad de usar un sistema evaporativo para enfriar una estructura en un vivero que produce en contenedor, depende del déficit de presión de vapor de agua del aire exterior, y de la eficiencia termodinámica del sistema. Tanto más seco el aire exterior, menor la temperatura para que el volumen de aire pueda ser enfriado (Fig. 3.1.18). El procedimiento para evaluar el potencial de enfriamiento utiliza un psicrómetro, y una carta psicrométrica, para determinar la depresión del bulbo húmedo, la cual indica la disminución en la temperatura que puede ser esperada a través de la evaporación (Langhans, 1980).

Un sistema típico de enfriamiento evaporativo, consiste de almohadillas absorbentes, con una bomba de agua para mantener las almohadillas húmedas sobre una pared, y con los ventiladores de extracción enclavados sobre la pared opuesta, para conducir el aire uniformemente a través de las almohadillas y sobre el área de cultivo (Fig. 3.1.19A). La eficiencia de un sistema evaporativo, depende en mucho de factores de diseño y de ingeniería, como es el tipo y grosor del material de las almohadillas, y la posición de éstas y los ventiladores, y es expresada como la temperatura del aire emergiendo de la pared húmeda, dividida por la depresión del bulbo húmedo (Nelson, 1985). Un sistema bien diseñado debería ser capaz de reducir la temperatura interna a aproximadamente 95% de la depresión del bulbo húmedo, aunque puede esperarse que la temperatura aumente

de 3 a 4°C (5 a 7°F) a través del invernadero, debido al recalentamiento solar (Ball, 1985).



Figura 3.1.16 La ventilación por convección, puede ser aumentada con sistemas de ventilación con tubos, los cuales introducen aire seco y frío dentro del cálido y húmedo techo del invernadero. Cabe señalar que cualquier equipo en el techo puede producir sombras que pueden reducir la fotosíntesis y afectar el crecimiento, si tal sombra es persistente sobre la misma área.

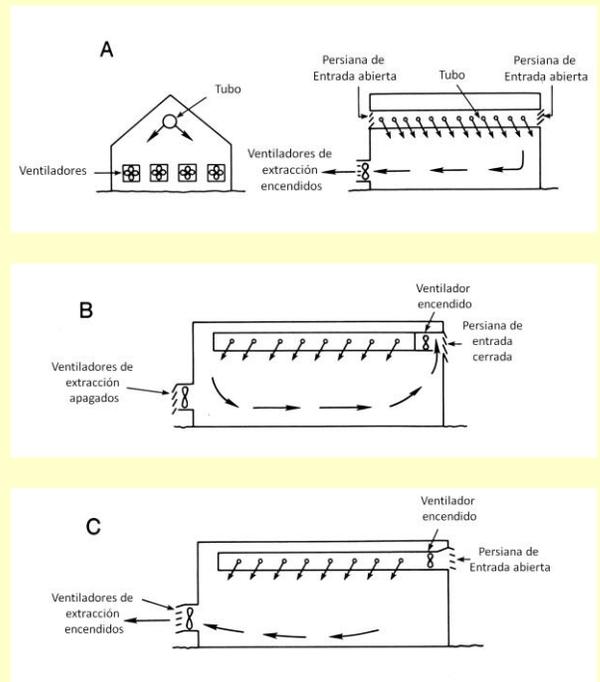


Figura 3.1.17 Los sistemas de ventilación con ventiladores a propulsión (A), usan ventilas con persianas y ventiladores de extracción, además de tubos de ventilación, para promover un mejor intercambio de aire. Con las persianas de entrada cerradas (B), un sistema de ventiladores a propulsión recircula el aire en el invernadero; con las persianas abiertas (C), los ventiladores pueden ser modificados para introducir aire frío del exterior (Adaptado de Langhans, 1980).

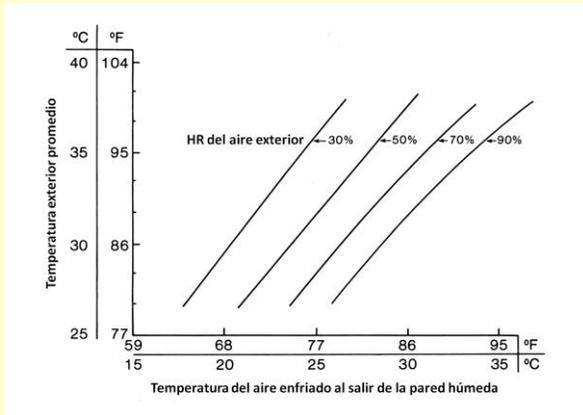
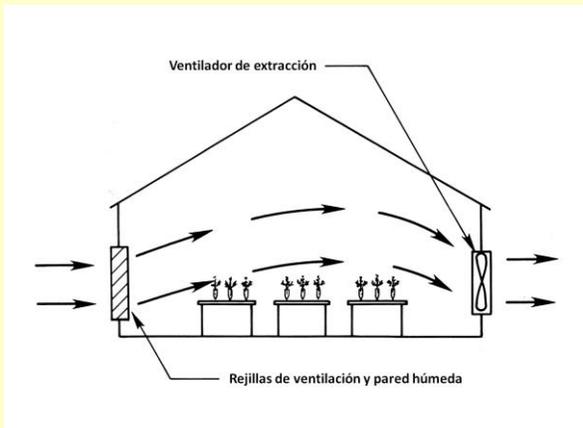


Figura 3.1.18 Los sistemas de enfriamiento evaporativo, son más eficientes en climas secos porque la proporción del enfriamiento aumenta con la depresión del bulbo húmedo, la cual es función de la humedad relativa (HR) y de la temperatura (modificado de Aldrich y Bartok, 1989).

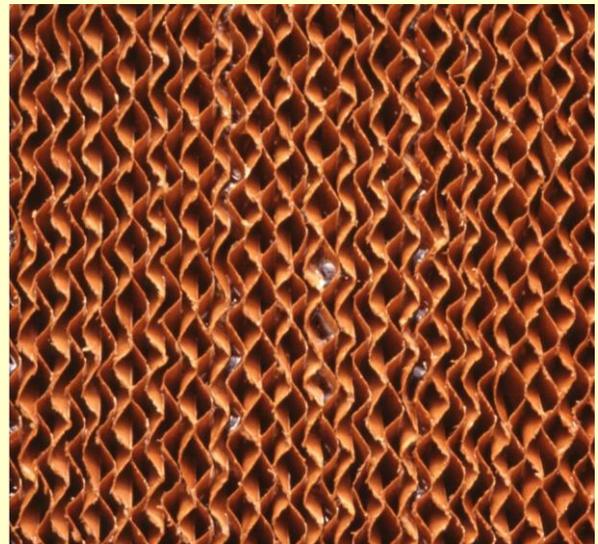
Los sistemas de enfriamiento evaporativo son comunes en los viveros forestales de climas cálidos y secos, que producen en invernaderos, y el más popular es el sistema de ventilador y almohadilla. Los ventiladores de extracción fueron discutidos en la sección previa de ventilación con ventiladores. Las almohadillas son montadas típicamente en forma vertical (Fig. 3.1.19A/B), y están hechas de cartón especialmente tratado (Fig. 3.1.19C), el cual puede prestar 10 años de servicio. Las virutas de madera de *Populus*, que duran sólo una estación, fueron usadas anteriormente. Las almohadillas horizontales, que contienen grava porosa, o roca volcánica, que es mantenida húmeda con boquillas para formar neblina, también han sido empleadas con éxito, pero son mucho menos comunes (Nelson, 1985).



A



B



C

Figura 3.1.19. Un sistema de enfriamiento evaporativo típico (A) consiste de almohadillas húmedas (pared húmeda) especialmente diseñadas sobre la pared final, y con ventiladores de extracción sobre la otra. Un sistema de bombeo para la recirculación (B) mantiene la almohadilla húmeda (C). El calor latente de evaporación reduce la temperatura del aire que viene a través de la almohadillas, y el aire frío es conducido a través del invernadero.

Enfriamiento en invierno. Debido a la elevada cantidad de radiación solar durante los días claros de otoño o invierno, frecuentemente es necesario introducir aire frío del exterior en el invernadero. Pero el aire frío puede dañar a las plántulas suculentas, por lo cual debe ser mezclado con aire cálido del interior antes de ser distribuido a través del invernadero. Algunas veces es prudente introducir aire seco del exterior después del riego, para evitar una excesiva humedad, y la condensación resultante (Fig. 3.1.20), la cual puede originar problemas con enfermedades como *Botrytis cinerea*.

El sistema de ventiladores a propulsión (Fig. 3.1.17A y C), que fue descrito en la sección previa de ventilación con ventiladores, ha probado ser un método efectivo de mezclado, y de distribución del aire exterior a través del invernadero durante el tiempo atmosférico frío. Varias compañías venden sistemas de control ambiental especialmente diseñados, los cuales pueden satisfacer la demanda de enfriamiento en invierno.

Técnicas de cultivo. Además de lo mencionado en las líneas anteriores sobre opciones de estructuras y equipo, los administradores de viveros pueden someter a enfriamiento a sus cultivos con varias técnicas, incluyendo la aplicación de sombra, el riego y las cubiertas para semillas.



Figura 3.1.20 Un uso común del "enfriamiento invernal", es para remover el aire cálido y húmedo que se acumula en los invernaderos cerrados luego del riego. Las elevadas humedades causan la condensación sobre el follaje de las plántulas, fenómeno que con frecuencia facilita la aparición de enfermedades como *Botrytis cinerea*.

Sombra. Debido a que la temperatura interna en un invernadero está directamente relacionada con la radiación solar, la reducción de la luz tiene un efecto de enfriamiento (Cuadro 3.1.6). La aplicación de materiales para proveer de sombra con el propósito de ayudar a controlar la temperatura durante el verano en exteriores, es una práctica hortícola tradicional, pero por desgracia, la sombra permanente también puede reducir los niveles de radiación solar hasta el punto en el cual la fotosíntesis y crecimiento de la plántula son afectados adversamente, especialmente durante los períodos con nubes (Langhans, 1980). Al menos con algunas especies, la sombra reduce el desarrollo de la raíz más que el crecimiento de la parte aérea (Barnett, 1989).

En aplicaciones hortícolas, la sombra puede ser fija o móvil. Los compuestos para la producción de sombra, especialmente las pinturas de sombra, son considerados como fijos, porque son aplicados durante toda la estación de cultivo, y son difíciles de remover. Debido a que funcionan reflejando una porción de la luz solar, sólo los colores blancos son recomendados y la cantidad de sombra es controlada por el grosor de la capa (Hanan et al., 1978). La pintura de sombra, usualmente se intemperiza o se lava, o es diseñada para desprenderse con la primera helada fuerte.

Las bandas fijas pueden ser usadas para producir una sombra permanente, y en algunos viveros que producen en contenedores utilizan estructuras de bandas especiales tanto para proporcionar sombra como para proteger a las plántulas durante la fase de endurecimiento, y para el almacenamiento invernal. Algunas armaduras estándar para dar sombra están hechas de cerca para nieve, y consisten de tiras de madera unidas con alambre, y con espacios vacíos alternos, de modo que producen un 42% de sombra. Aunque en algunos viveros que producen en contenedores en áreas bajo sombra, esta cantidad está considerada generalmente como muy alta para la mayoría de las especies.

Una variedad de diferentes marcas de mallas de sombra a base de materiales sintéticos pueden ser usadas para producir sombra permanente (Fig. 3.1.21A). Están disponibles en diferentes materiales o niveles de sombreado que podrán producir cualquier cantidad de sombra deseada, de entre 25 al 90%. Aunque los implementos de las mallas para producir sombra pueden ser montados dentro de la estructura de cultivo, esto no es recomendable porque absorberá la radiación solar e interferirán con la adecuada

ventilación, contribuyendo así a un calentamiento (Davis y Cole, 1976). El montaje de las mallas para sombra en el exterior es una mejor opción, pues si son instaladas apropiadamente, no resultarán dañadas por el viento ni por el granizo, y disiparán el calor fuera del invernadero. Con frecuencia el establecimiento y el retiro de las mallas para el sombreado implican una labor intensa (Fig. 3.1.21B).

Cuadro 3.1.6 El sombreado de una estructura de cultivo puede reducir con eficiencia tanto las temperaturas del follaje como las del aire.

Tipo de estructura de cultivo	Intensidad de la luz		Temperatura del aire		Temperatura de la hoja	
	$\mu\text{moles/s/m}^2$	Pies-candela ($^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
Sin sombra	1,370	70,200	36	97	40	105
Malla de sombra al 50%	525	27,000	32	90	32	89

Fuente: Gray (1948).



A



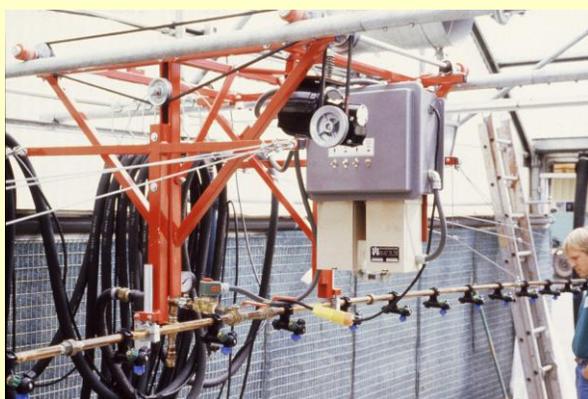
B

Figura 3.1.21 La malla sintética para producir sombra, tradicionalmente empleada para enfriar invernaderos, es instalada y dejada a través de los meses de verano (A). Cuando la intensidad de la luz declina en el otoño, la malla debe ser retirada (B).

En años recientes, han comenzado a estar disponibles de manera comercial, cortinas para sombra retráctiles, controladas mecánicamente, y que pueden ser instaladas tanto dentro como fuera del invernadero. Unas pantallas de polyester entretejido o entrelazado, pueden ser montadas dentro del invernadero para enfriarlo en verano, y para retardar la pérdida de calor por la noche durante el tiempo frío. Un original tipo de cortina sombreadora con bandas alternas de material aluminizado y claro, posee la ventaja agregada de reflejar la luz difusa dentro del invernadero, mientras refleja la radiación térmica no buscada. Garzoli (1988), consideró estas pantallas sombreadoras reflectoras, muy valiosas para el enfriamiento en invernaderos a través de Australia (las cortinas sombreadoras retráctiles también funcionan para retardar la pérdida de calor en la noche y para controlar el período con luz. Se da información adicional sobre el particular en la sección 3.1.4, y en el capítulo 3 de este volumen).

Riego. Los administradores de viveros que producen en contenedores, pueden utilizar el elevado calor latente de la evaporación para ayudar a enfriar sus cultivos a través de esquemas con breves explosiones (asperjado) de riego durante el momento más cálido del día. Esto es particularmente efectivo durante

la fase de establecimiento, cuando las plántulas jóvenes y suculentas pueden ser fácilmente dañadas por elevadas temperaturas en la superficie del medio de cultivo. El asperjado enfriador puede también abastecer a las plántulas jóvenes con suficiente agua sin la saturación del medio de cultivo. En algunos viveros han instalado en sus equipos de irrigación móviles (Fig. 3.1.22A) unas boquillas de posiciones múltiples, que contienen una cabeza asperjadora además de las boquillas estándares para riego (Fig. 3.1.22B). Las plántulas más viejas pueden ser refrescadas mediante el riego, de manera periódica para suplementar los sistemas de enfriamiento estándares cuando prevalece un tiempo atmosférico inusualmente cálido.



A



B

Figura 3.1.22 Las plántulas pueden ser refrescadas a través de riegos ligeros y frecuentes. Algunos viveros que producen en contenedores, tienen equipos de riego móviles (A), los cuales cuentan con cabezas asperjadoras compuestas, que contienen una boquilla asperjadora, además de la boquilla para riego estándar (B).

El agua corriente sobre el exterior del invernadero puede reducir las temperaturas internas del aire, y esto puede aplicarse con una regadera en situaciones de emergencia. Sin embargo, se ha encontrado en algunas investigaciones que la filtración selectiva de las longitudes de onda térmicas de la radiación solar, a través de una película de agua corriente, puede no proveer un enfriamiento adecuado (Garzoli, 1988).

Cubierta (“mulches”) para la semilla. El utilizar una cubierta (“mulch”) de color claro para la semilla después de la siembra (Fig. 3.1.7), también ayudará a prevenir temperaturas superficiales dañinas. Las cubiertas oscuras absorben más radiación solar, y rápidamente alcanzan temperaturas que pueden escaldar los tallos suculentos de las plántulas jóvenes. Las cubiertas de color claro, en combinación con la neblina enfriadora, son particularmente eficientes para prevenir daños por calor en los tallos de las plántulas jóvenes (El daño por calor se discute a gran detalle en el volumen cinco de esta serie).

3.1.4.4 Calentamiento

Aún si los invernaderos reciben un suplemento de calor solar libre durante las horas del día, estos deben estar equipados con sistemas de calentamiento para mantener lo suficientemente cálidos a los cultivos en la noche, para complementar la radiación solar en días nublados. Los sistemas de calentamiento se han hecho lo suficientemente eficientes en los últimos años pero un invernadero es una estructura difícil de ser mantenida lo suficientemente caliente para un cultivo. Las estructuras de cultivo están diseñadas para capturar la mayor luz solar posible, pero tienen la característica de estar pobremente aisladas. En climas de elevadas latitudes, el costo del combustible con frecuencia es un factor limitativo, así que los viveros que producen en contenedores deben estar diseñados cuidadosamente, a efecto de poder ser calentados tanto eficiente como económicamente.

Calculando los requerimientos de calentamiento. El concepto básico en el calentamiento de una estructura de cultivo, es agregar calor a la misma tasa a la cual es perdido, y así el sistema de calentamiento debe ser ajustado a las propiedades de la estructura de cultivo. La mayor parte del calor es perdido por conducción, a través de los materiales de soporte que sostienen la cubierta del invernadero, y por el material de cobertura mismo. Recuerde que las pérdidas de calor no son las mismas para todas las cubiertas. Por ejemplo, los paneles de fibra de vidrio pierden solamente el 1% de la radiación que ingresa, en comparación con el 4.4% para el vidrio, y el 70.8% para una película simple de polietileno. Agregando una segunda película de polietileno, para crear un espacio de aire aislante, se reduce la pérdida de calor en aproximadamente 40% (Nelson, 1985). La entrada de aire frío a través de rupturas y por las puertas, puede contribuir con una pérdida de calor considerable. Los especialistas en el calentamiento de invernaderos, toman medidas de la superficie de éstos, y aplican coeficientes de pérdida de calor para calcular una estimación aproximada del calor total perdido por la estructura. Si se requiere de una estimación más precisa de los requerimientos de calor, otros factores deben ser considerados, tales como la velocidad del viento (Langhans, 1980; Acme, 1988). Los requerimientos de calor para un vivero que produce en contenedores, variarán durante el año; éstos son más elevados en el invierno, cuando la entrada de energía solar es menor, y la cubierta de nubes es mayor, pero se torna despreciable durante los meses de verano (Cuadro 3.1.7).

Tipos de combustibles. La selección de un combustible para el calentamiento de un invernadero es crítica, ya que el combustible puede afectar significativamente los costos de operación, si los árboles son cultivados durante los periodos fríos del año. Aunque el costo con frecuencia es la consideración más obvia, otros factores del combustible y del equipo para el calentamiento deben ser contemplados: disponibilidad (en particular la dependencia de la oferta), conveniencia de uso y almacenamiento, y la limpieza. Las

consideraciones relacionadas con el equipo de calentamiento, incluyen los requerimientos de operación, necesidades de servicio, y facilidad del control (ASHRAE, 1989). Muchos tipos comunes de combustibles han sido utilizados para calentar invernaderos, pero algunos que son abundantes a escala local, y baratos como el carbón mineral (hulla), pueden ser inconvenientes dado su potencial para la contaminación del aire. La siguiente discusión general sobre combustibles comunes en invernaderos, está presentada en el orden de preferencia encontrado en la Investigación de viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.1.8). Información más específica puede ser hallada en Langhans (1980), Nelson (1985) y ASHRAE (1989).

Cuadro 3.1.7 Requerimientos de calentamiento mensual para un invernadero en State College, Filadelfia.

Mes	Días-Grado promedio	Porcentaje de la estación de calentamiento total
Enero	1,401	24
Febrero	933	16
Marzo	608	10
Abril	379	7
Mayo	139	2
Junio	44	1
Julio	0	0
Agosto	12	0
Septiembre	83	1
Octubre	439	7
Noviembre	766	13
Diciembre	1,130	19
Total	5,934	100

Fuente: Departamento Estatal de Horticultura de Pennsylvania (Pennsylvania State Department of Horticulture), presentado por Ball (1985).

Gas. El gas natural está compuesto principalmente por metano y etano, dependiendo de la fuente geológica; por seguridad, se le agregan mercaptanos para producirle un olor distintivo. Donde está disponible, el gas natural es el combustible preferido para el calentamiento de invernaderos, ya que es fácil y económica la instalación de calentadores, no se requiere de tanques de almacenamiento, y el gas calienta bastante y en forma limpia. El gas natural fue utilizado en el 33% de los viveros forestales investigados en 1984 (Cuadro 3.1.8). La contaminación del aire no es un problema, pues los únicos subproductos derivados de la combustión del gas natural son vapor de agua y dióxido de carbono.

Los gases de petróleo licuado (LP) (propano, butano, y mezclas de los dos), son producidos comercialmente como subproductos de refinерías de petróleo o por derivación del gas natural. Estos comparten muchas de las ventajas del gas natural, pero normalmente son más caros y deben ser almacenados en tanques (Fig. 3.1.23). El propano es el único gas LP que resulta apropiado para muchos viveros forestales, porque éste puede ser utilizado a temperaturas bajo cero, mientras que el butano no. Independientemente de su mayor costo, el propano resultó ser el segundo combustible más usado, porque tiene las mismas características que el gas natural, y puede ser transportado por camión a localidades remotas (Cuadro 3.1.8).

Petróleo. El petróleo para calentar (o combustible) es también comúnmente usado en los viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.1.8). El petróleo viene en muchos grados que están determinados por la viscosidad (la cual incrementa con el número de grado), y otros factores. Los petróleos pesados cuestan poco menos y tienen mayor contenido calorífico, pero deben ser precalentados antes de que puedan entrar en ignición (ASHRAE, 1989). El grado No. 1 es el keroseno, el cual no es típicamente usado para el calentamiento de invernaderos; el No. 2 es el combustible común utilizado para unidades calentadoras, porque éste puede no tener que ser precalentado. A causa de sus elevadas viscosidades, los grados 4, 5 y 6 son usados solamente para grandes hornos, empleados en sistemas de calentamiento central (Bartok, 1990). Sus contenidos de azufre, son también de considerarse, y están relacionados con el grado, oscilando de un máximo permisible de 0.64% para el petróleo de calentamiento No. 2, al 4.00% para el No. 6. Además de su potencial para contaminar el aire, los combustibles con alto contenido de azufre son más corrosivos para el equipo de calentamiento.

Electricidad. El calentamiento eléctrico no es común en los viveros ornamentales, pero fue el cuarto más popular en la investigación de los viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.1.8). Esta popularidad es probablemente un reflejo del hecho que la

electricidad fácilmente puede ser transmitida en localidades donde están disponibles otras pocas opciones. Además de ser la fuente de energía más eficiente para el calentamiento (Cuadro 3.1.8), la electricidad tiene la ventaja de ser silenciosa, limpia y no contaminante. No obstante, es la fuente de energía más cara con mucho.

Madera. En algunas áreas de Norteamérica, donde la madera es barata y fácil de conseguir, esta fuente de energía está siendo utilizada para el calentamiento de viveros forestales que producen en contenedor (Fig. 3.1.24). En comparación con otros combustibles, la madera tiene una producción relativamente baja de calor (Cuadro 3.1.8), es voluminosa, y crea una cantidad considerable de cenizas, la cual debe ser removida. Sin embargo, la madera es un combustible bueno, relativamente no contaminante cuando es quemada en un horno apropiadamente diseñado y con buen mantenimiento. Las bolas de madera son una innovación reciente que pueden resultar prácticas para el calentamiento de invernaderos, especialmente en áreas donde otros combustibles no están disponibles.



Figura 3.1.23 El gas propano es un combustible popular para el calentamiento de invernaderos en viveros forestales enclavados en áreas remotas.

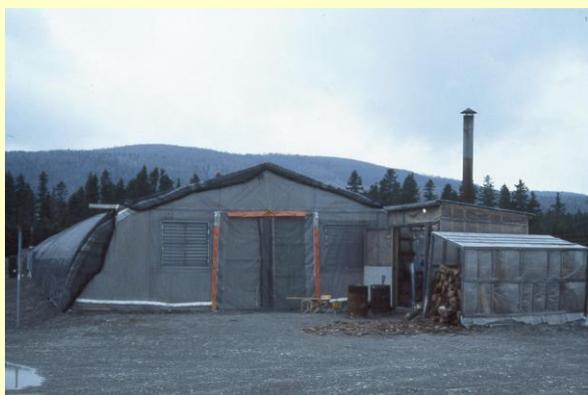


Figura 3.1.24 El calentamiento con madera es una alternativa natural para los viveros forestales, puesto que la madera está fácilmente disponible y es barata en muchas localidades.

Cuadro 3.1.8 Propiedades caloríficas de los combustibles comúnmente usados en los viveros forestales que producen en contenedores en Norteamérica.

Fuente de calor	Uso en viveros forestales (%)	Valores típicos de los combustibles				Eficiencia de calentamiento (%)
		Unidades métricas		Unidades inglesas		
		Peso (Kcal/g)	Volumen (Kcal/l)	Peso (Btu/lb)	Volumen (Btu/pie ³)	
Gas Natural *	33	14.3 – 15.4	10.4 -21.8	23,600 -25,500	890-1,860	65-87
Propano +	24	13.8	8,000	22,900	794,000	65-87
Petróleo combustible	24					
Grado No. 2	--	10.6	10,100	17,500	1,038,000	70
Grado No. 4	--	11.7	11,200	19,300	1,147,000	65
Madera	5	4.6	2,760	7,560	283,500	60
Carbón Mineral	0	7.2	14,400	12,000	1,500,000	62
Valor típico de energía						
		Unidades métricas		Unidades inglesas		
Electricidad	9	860 Kcal/Kwh		3,412 Btu/Kwh		100
Radiación solar	2	1.4-3.3 Kcal/día/m ²		500 – 1,200 Btu/día/pie ²		ND
Calor de desecho	3	Variable, ver ejemplos en el texto				

* Gas natural consistente en variis mezclas de metano y etano, que tienen distintos niveles de combustión

+ El propano es abastecido como un líquido presurizado, pero es quemado como un gas.

Fuente: Modificado de Nelson (1985) y Langhans, (1980).

Carbón mineral. Este fue un combustible tradicional para el calentamiento de invernaderos, pero no es comúnmente usado en los viveros forestales que producen en contenedor (Cuadro 3.1.8). Cuando está fácilmente disponible, el carbón generalmente es el combustible más barato, pero resulta voluminoso al ser cargado y almacenado. Algunos grados son altos en azufre, y por tanto no están disponibles, a causa de los problemas de contaminación al aire.

Desde la crisis de los combustibles en los años setenta, los administradores de viveros se han hecho mucho más conscientes del costo de los combustibles para el calentamiento, de modo

que muchas nuevas opciones han sido exploradas:

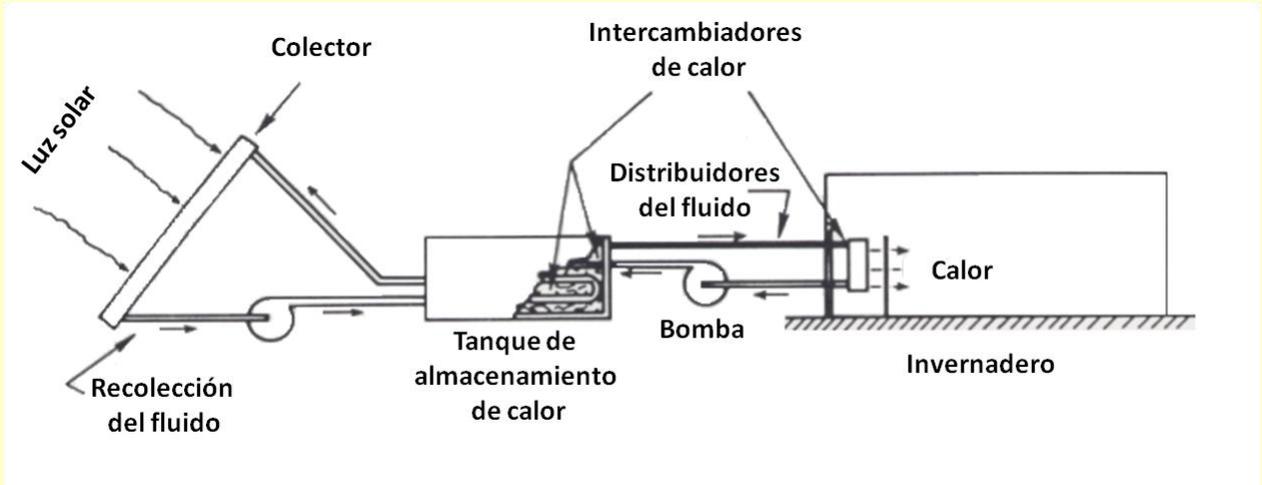
Calor de desecho. Algunos viveros forestales se han adaptado para utilizar el calor generado en otras industrias para el cultivo de plántulas forestales (Cuadro 3.1.8). Como ejemplo, por cada mil millones (1 billón americano) de Kilocalorías que son convertidas a electricidad en plantas generadoras, otra cantidad igual es perdida en el agua de enfriamiento. Esta agua caliente podría ser fácilmente usada para el calentamiento de invernaderos (Langhans, 1980). En un vivero se reportó que el agua de enfriamiento a 32°C (90°F) de una planta de poder, proveía 750,000 Kcal/h de calor para

sus invernaderos (Investigación de Viveros que producen en Contenedores).

Calor del sol. Por su solo diseño, todos los invernaderos usan energía solar para satisfacer al menos parte de sus requerimientos de calor. Pocos viveros forestales reportaron que la energía solar es su principal fuente de energía para el calentamiento (Cuadro 3.1.8). Diversos sistemas solares de calentamiento han sido diseñados para los invernaderos (Fig. 3.1.25A), pero éstos no han sido ampliamente adoptados a causa del bajo costo y disponibilidad de los combustibles fósiles. Sin embargo, los administradores de viveros que producen en contenedores pueden realizar pequeñas modificaciones estructurales para captar la energía solar que es tan abundante durante el día, y almacenarla para usarla durante la noche (Fig. 3.1.25B). Las mantas de aislamiento térmico son simples en diseño y muy efectivas para retener la energía solar captada (Ver la siguiente sección acerca de conservación del calor, para más detalles).

Calentadores y sistemas de distribución de calor. Una vez que el tipo de combustible ha sido seleccionado, el paso siguiente es convertirlo a calor utilizable, y la primera decisión es si usar una unidad o calentadores centrales. Con un sistema grande de calentamiento central, uno o dos grandes calentadores son ubicados en posición individual (Fig. 3.1.26B). Estos sistemas requieren de una gran inversión inicial, de US \$16 a US \$32/m² (US \$1.50 a US \$3.00 por pie cuadrado), de manera que únicamente son económicos para viveros a gran escala.

Las unidades calentadoras son mucho más pequeñas, y están localizadas en cada estructura de cultivo (Fig. 3.1.27A). Estas son más prácticas para operaciones en viveros pequeños, y su costo es de aproximadamente US \$ 2.70 a US \$10.80/m² (US \$0.25 a US \$1.00/pie²) (Nelson, 1985).



A



B

Figura 3.1.25 Aunque muchos sistemas han sido diseñados para los invernaderos (A), pocos viveros forestales dependen solamente de la energía solar. Sin embargo, los administradores de viveros pueden modificar sus estructuras de cultivo para captar la energía solar y retardar las pérdidas nocturnas. Barriles negros llenos de agua son calentados por el sol durante el día y proporcionan calor por la noche (B) (A, cortesía de D.H. Willits).



A



Figura 3.1.26 Los sistemas centrales de calentamiento usan un gran boiler (A), generalmente ubicado en un edificio separado, para generar agua caliente o vapor, que son distribuidos a través de tuberías para calentar determinado número de estructuras de cultivo que están alrededor (B).

Vapor o agua caliente. Un sistema tradicional para el calentamiento de invernaderos, es el vapor caliente o el agua caliente en un boiler central (Fig. 3.1.26A), pero los nuevos boilers de alta eficiencia son lo suficientemente pequeños para caber, dentro de estructuras individuales. El agua o el vapor son circulados a través de tubería fina y plana alrededor de paredes, techo, y bajo las camas (Fig. 3.1.26B), o en el piso. El calor radiante de estos tubos circula a través del invernadero por convección, así que la localización de los tubos de calentamiento es crítica. Aunque el vapor es la forma más eficiente de transferir calor, éste representa algunos problemas de mantenimiento. Los sistemas de agua caliente generalmente proporcionan temperaturas más uniformes (Langhans, 1980). Los sistemas grandes de calentamiento central son más eficientes cuando operan a su capacidad total, así que deben ser apropiadamente ajustados a la escala de operación en el vivero. El vapor o el agua caliente fueron utilizados aproximadamente por el 26% de los viveros forestales que producen en contenedor, investigados en 1984.

Aire caliente. En muchas operaciones de viveros que producen en contenedor, se usan unidades calentadoras pequeñas, auto-contenidas. Estos calentadores con aire forzado queman combustible en una cámara de combustión baja, y los gases calentados ascienden a través de tubos intercambiadores de calor, y son vaciados mediante una

chimenea de salida. Un ventilador en la parte trasera de los calentadores sopla a través de los intercambiadores de calor, y el aire caliente es descargado directamente dentro del invernadero, o dentro de un sistema de distribución de ventiladores a propulsión (Fig. 3.1.27B). La última opción es la preferida porque los sistemas de descarga directa crean problemas con la circulación de calor, y el aire caliente que sopla directamente sobre el cultivo puede originar un secado sucesivo (Langhans, 1980). Las unidades calentadoras de aire forzado son el tipo más común (71%) de sistemas de calentamiento utilizados en viveros forestales. Los tubos de distribución son colocados frecuentemente bajo los bancos de crecimiento (Fig. 3.1.27B), para que el aire caliente pueda ascender a través de las plántulas, calentando el medio de cultivo y secando el follaje. El calentamiento bajo los bancos es particularmente efectivo en la reducción de la incidencia de ciertas enfermedades fungosas, como es el "moho gris" (*Botrytis cinerea*).

Calentadores radiantes. En la década pasada, en algunos viveros forestales que producen en contenedor (2%) se habían instalado sistemas de calor radiante en el techo (Fig. 3.1.28A), también denominados calentadores infrarrojos. Estas unidades calentadoras de baja energía consisten de una serie de pequeños calentadores de gas que son espaciados a intervalos regulares a lo largo de una tubería metálica (Fig. 3.1.28B).

Los gases calentados son canalizados a lo largo de la tubería y la calientan hasta una temperatura que produce radiación infrarroja, y los gases son expulsados al final. La radiación térmica producida es dirigida sobre las plantas mediante reflectores de aluminio, montados por encima de la tubería caliente. Los calentadores infrarrojos son muy energético-eficientes; algunos viveristas ornamentales han reportado una reducción de 30 e 50% en el uso de combustible (Nelson, 1985).

Una característica única de los calentadores radiantes en el techo, es que las plantas son mantenidas más cálidas que el aire

circundante, porque los rayos infrarrojos no son convertidos en calor hasta que son absorbidos por las plantas. Esto prácticamente elimina la condensación, la cual es una de las principales causas de enfermedades foliares. Los calentadores infrarrojos son apreciados también por los trabajadores de viveros porque la radiación térmica calienta a los individuos sin un calentamiento innecesario del aire (Fig. 3.1.28A). Una desventaja de este sistema, es que después del cierre de copas de las plántulas, el follaje absorbe todo el calor, y así el medio de cultivo puede quedar muy frío (Langhans, 1980).

Conservación de calor. Durante la crisis energética de inicio de los años setenta, el incrementante costo y escasez de los combustibles de calentamiento tradicionales, promovió un esfuerzo activo de investigación y desarrollo para reducir los requerimientos de energía de los invernaderos. Actualmente, las estructuras de cultivo bien diseñadas están mucho mejor aisladas y equipadas con sistemas de calentamiento energético-eficientes. Las siguientes sugerencias deberían ser consideradas cuando se diseña un vivero forestal para la producción en contenedores.

Seleccionar sitios con amortiguamiento para el vivero. Los viveros forestales que producen en contenedores, no deberían ser instalados en áreas sujetas a heladas, ni en aquellas con mucho viento ni en áreas expuestas. Las cortinas rompe-vientos pueden ser eficientes en la reducción de pérdida de calor por conducción en la medida en que éstas no sombreen el área de cultivo (la selección del sitio se discute a detalle en el volumen uno de esta serie).

Maximizar la captura de energía solar. Evitar la sombra en la estructura de cultivo, a través de la minimización de tuberías y estructuras en el techo. El equipo de calentamiento o enfriamiento enclavado en el techo puede crear patrones de sombreado, los cuales a su vez pueden reducir la fotosíntesis (Fig. 3.1.16). Mantenga la cubierta del invernadero limpia y reemplace regularmente las secciones intemperizadas.



A



B

Figura 3.1.27 Las unidades calentadoras son relativamente pequeñas y están localizadas en cada estructura de cultivo (A), donde éstas son colocadas para distribuir calor directamente al cultivo de plántulas (B).



A



B

Figura 3.1.28 Los calentadores radiantes en el techo (A) calientan objetos (plántulas y trabajadores) sin aumentar la temperatura del aire de alrededor. El gas es quemado en cámaras de combustión localizadas a lo largo de la tubería de calefacción, la cual está equipada con escudos para reflejar la radiación infrarroja hacia abajo (B).

Aislar la estructura de cultivo. El aislamiento es particularmente importante en viveros que producen en contenedores, porque los invernaderos pueden perder calor 5 a 10 veces más rápido, en promedio, que una casa residencial. Langhans (1980), discute opciones que pueden reducir significativamente las pérdidas de calor. Estas son la adición de 1) una cubierta extra de plástico sobre el invernadero para crear un espacio de aire aislante, 2) cortinas de calor retráctiles, y 3) aislamiento permanente para las paredes que miran al norte y las áreas del techo.

Una cubierta extra de plástico es efectiva sobre estructuras construidas con láminas de polietileno o con paneles rígidos. Las estructuras cubiertas con capas dobles de polietileno están equipadas con un pequeño soplador que mantiene un espacio aislante de aire entre las capas, y se ha reportado en ellas un ahorro de energía de 30 a 40% en comparación con las estructuras de capa simple. Aproximadamente dos tercios de los viveros en la Investigación de Viveros que producen en Contenedores tenían cubiertas energético-eficientes de doble capa (Ver volumen uno de esta serie para más información acerca de estructuras de cultivo).

Las cortinas de calor retráctiles pueden ser extendidas sobre el cultivo en la noche, para reducir las pérdidas tanto por la radiación como por la convección (Fig. 3.1.29A), mientras no se interfiera con los requerimientos de luz solar durante el día (Fig. 3.1.29B). Casi todo material que pueda ser suspendido en alambres y empujado hacia atrás y adelante con un sistema de poleas, puede ser usado como cobertor térmico. Están disponibles comercialmente unos sofisticados sistemas automáticos, y pueden ser instalados en cualquier tipo de estructura de cultivo, sin interferir con la luz del fotoperiodo ni con el sistema de riego (Fig. 3.1.29C). Las cortinas retráctiles son también utilizadas para producir sombra de enfriamiento (ver sección 3.1.4.3), y en el control del fotoperíodo (ver capítulo tres de este volumen).

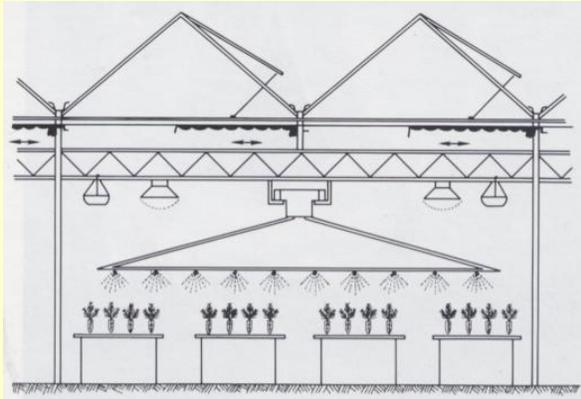
El agregar aislamiento, especialmente abajo de la altura de las camas de cultivo, y sobre las paredes con exposición norte (Fig.3.1.20A), puede ser efectivo para retardar las pérdidas de calor. Se ha demostrado mediante pruebas que una pérdida neta de luz solar acontece a través de la pared norte de una estructura de cultivo, así que cubriendo ésta y el techo con un material aislante-reflejante, la pérdida de calor puede ser retrasada mientras se aumenta la radiación fotosintéticamente activa; otras capas aislantes inflables pueden ser instaladas encima (Fig.3.1.30B), o a lo largo de las paredes (Fig. 3.1.14).



A



B



C

Figura 3.1.29 Las cortinas retráctiles reducen las pérdidas de calor a través del invernadero cubierto durante la noche (A), sin interferir con la luz solar durante el día (B), ni con otros controles ambientales como los sistemas de riego, o las luces para fotoperíodo (C) (C, cortesía de Cravo Equipment Company).

Ser espacio eficiente. Utilice el espacio de cultivo eficientemente en el invernadero, manteniendo la estructura llena con plantas, pues el cultivo crea una masa térmica que puede retener calor mejor que cualquier estructura vacía. Minimice los espacios aislados y los bordes y, de ser posible, utilice bancos móviles.

Modificar los procedimientos de cultivo para conservar energía. Mantenga temperaturas en el área de cultivo para producir el mayor crecimiento en las plántulas con la mínima inversión de energía. Debido a que los requerimientos de calentamiento son mayores en la noche, reduzca la temperatura nocturna tanto como sea posible. Langhans (1980), reporta que la reducción de la temperatura nocturna en sólo 30°C (5°F), resultará en un ahorro de 17% en los costos de calentamiento; pudiéndose alcanzar en algunos casos el 50% (Cuadro 3.1.9).

Diseñar calendarios de cultivo en función del calendario solar. Una calendarización cuidadosa del cultivo puede resultar en considerables ahorros en calor, especialmente cuando se produce más de un cultivo por año. Los viveristas deberían diseñar sus calendarios para que los árboles sean endurecidos durante los meses fríos, y los cultivos de invierno deben consistir de especies que toleren bajas temperaturas. En

algunas localidades, los cultivos pueden no ser económicos durante la estación invernal, a causa del alto costo del calentamiento (La calendarización es descrita con mayor detalle en la sección 3.3.31 y en el volumen seis de esta serie).



A



B

Figura 3.1.30 Los invernaderos pueden perder calor hasta 10 veces más rápido que las estructuras ordinarias, así que su aislamiento debería proporcionarse a lo largo de las paredes norte (A) y alrededor del perímetro bajo la altura de bancos. También pueden ser instalados techos inflables de plástico en la parte superior (B).

Cuadro 3.1.9 Porcentaje de ahorro en combustibles cuando las temperaturas de los invernaderos son reducidas de 2 a 6°C (5 a 10°F).

Temperatura exterior		Reducción de la temperatura interior			
°C	°F	18-16 °C 65-60 °F	18-13 °C 65-55 °F	16-13 °C 60-55 °F	16-10 °C 60-50 °F
-7	20	11	22	12	24
-4	24	12	24	14	28
-2	28	13	26	16	32
0	32	15	30	18	36
2	36	17	34	21	42
4	40	20	40	25	50

Fuente: Departamento Estatal de Horticultura de Pennsylvania (Pennsylvania State Department of Horticulture), citado por Ball (1985).

3.1.5 Monitoreo y Sistemas de Control de Temperatura

A causa de que la temperatura es crítica para el cultivo de plantas de especies forestales, los viveristas deberían monitorear las temperaturas de aire y suelo a través del ciclo de cultivo. Los viveristas exitosos utilizan dispositivos sensibles a la temperatura para detectar cuándo las condiciones alcanzan niveles dañinos, y alarmas que son activadas cuando las temperaturas comienzan a ser muy cálidas o muy frías. Muchos viveros modernos que producen en contenedores, tienen sistemas de control ambiental sofisticados, que son continuamente monitoreados por computadora, pero aún la más simple instalación debería tener ciertos instrumentos para monitorear y controlar la temperatura.

3.1.5.1 Instrumentos sensores

Los viveristas tradicionalmente miden la temperatura ambiente con termómetros estándar de vidrio. El termómetro "max-min" (Fig.3.1.31A), es un instrumento barato que debería ser usado en todos los viveros que producen en contenedores. No solamente pueden ser leídas las temperaturas actuales, también los extremos máximo y mínimo pueden ser registrados automáticamente. Un registro de las fluctuaciones de temperatura diarias puede ser fácilmente obtenido a través del registro de los valores y reiniciando la actividad del aparato. Están disponibles en el comercio varios termómetros electrónicos relativamente baratos, y algunos cuentan con sondas largas que son empleadas para verificar la temperatura del medio de cultivo dentro del contenedor. Algunos de estos instrumentos tienen pantalla digital y almacenamiento de datos, y sin embargo son lo suficientemente pequeños para ser portados en una bolsa (Fig. 3.1.31B).

A causa de que no son inherentemente precisos, los termómetros y otros equipos de monitoreo ambiental deberían ser calibrados antes de su uso inicial y a intervalos regulares. La más importante fuente de error al medir la temperatura, es el efecto de la radiación solar. Los termómetros siempre deberían estar a la sombra cuando son usados, y los instrumentos montados permanentemente deben ser

colocados fuera del alcance de la luz solar directa. Algunos instrumentos son cubiertos y ventilados, esto es, un somero flujo de aire es empujado sobre el instrumento con un pequeño ventilador (la adecuada ubicación del equipo de control ambiental, se discute más en el volumen uno de esta serie).

Otra pieza de equipo indispensable para el vivero, aunque barata, es el higrotermógrafo (Fig. 3.1.31C), el cual continuamente registra tanto la temperatura del aire como la humedad relativa. El higrotermógrafo básico contiene un termómetro con tira bimetálica, el cual mide la temperatura con base en el diferencial de dilatación de dos tiras de metales distintos embonadas juntas, y un higrómetro de pelo, el cual usa porciones de pelo humano para registrar cambios en la humedad relativa. Estos instrumentos manuales contienen un tambor de registro, y los modelos pueden comprarse con registro para una semana o para un mes entre servicios. Los tambores funcionan gracias a mecanismos de relojería o baterías, así que se les puede dar cuerda nuevamente o ser chequeados regularmente.

Los viveristas deberían planear el tener al menos un higrotermógrafo para cada estructura de cultivo. Éstos pueden ser movidos a varias localidades para verificar en lugares cálidos o fríos, o pueden servir también como un estándar mientras otros sitios son verificados con termómetros. Así como todo equipo para el monitoreo de la temperatura, los higrotermógrafos deberían mantenerse a la sombra. Deben ser calibrados regularmente, con un termómetro preciso, y con un psicrómetro de honda.

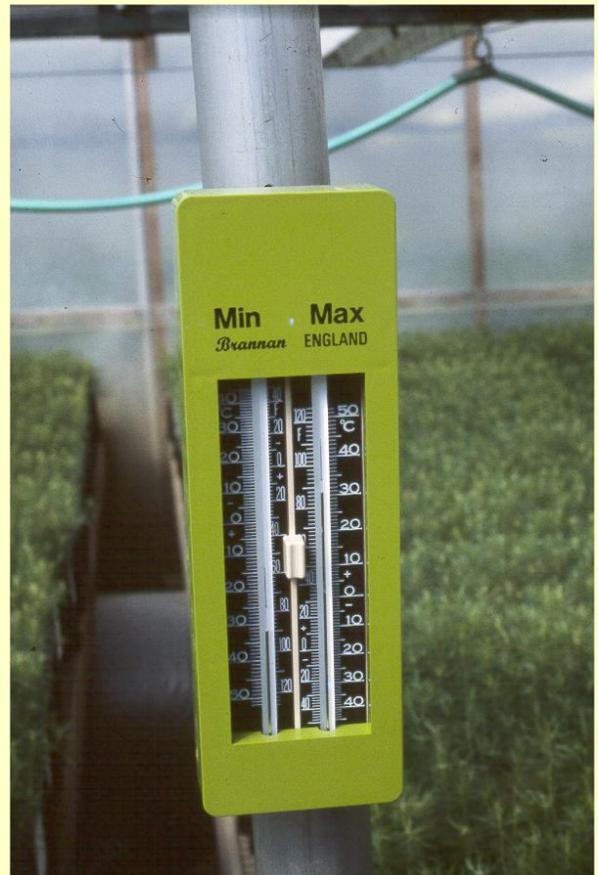
Muchos invernaderos modernos son ajustados con equipos electrónicos de control sofisticado, que monitorean temperatura y muchos otros factores ambientales.

3.1.5.2 Equipo de control

Un termostato mecánico, el cual consiste de un sensor de temperatura y un interruptor, puede ser usado para activar cualquier cosa, desde ventilas motorizadas hasta válvulas en las

líneas de riego por nebulización. La sensibilidad a la temperatura en un termostato, es denominada el diferencial, el cual se expresa como el número de grados entre las acciones del interruptor; muchos termostatos de invernaderos tienen un diferencial de 0.5 a 2°C (1 a 4°F). El intervalo de un termostato es el intervalo de temperatura en el cual el interruptor puede operar, generalmente el intervalo es de 2 a 40°C (35 a 105°F). Los termostatos proveen una simple función de control de encendido-apagado, y pueden ganarse múltiples funciones con el empleo de más de un termostato (Fig. 3.1.32A) (Aldrich y Bartok, 1989). Los termostatos mecánicos no son caros, pero su exactitud y precisión no son confiables, y por ello deben ser calibrados regularmente (Nelson, 1985).

El siguiente paso en la sofisticación y costo, es el termisor, el cual es un sensor térmico en estado sólido que cambia de voltaje de salida en respuesta a la temperatura y activa un interruptor. Los termisores pueden ser integrados a un circuito con un microprocesador, o a una computadora, para formar un sistema de control "inteligente" (Nelson, 1985). Los sistemas de control ambiental sofisticados, pueden captar e integrar varias variables ambientales a la vez, y controlar las etapas de calentamiento y de enfriamiento (Fig. 3.1.32B) (se presenta más información acerca de los sistemas de control ambiental en el volumen uno de esta serie).



A



B



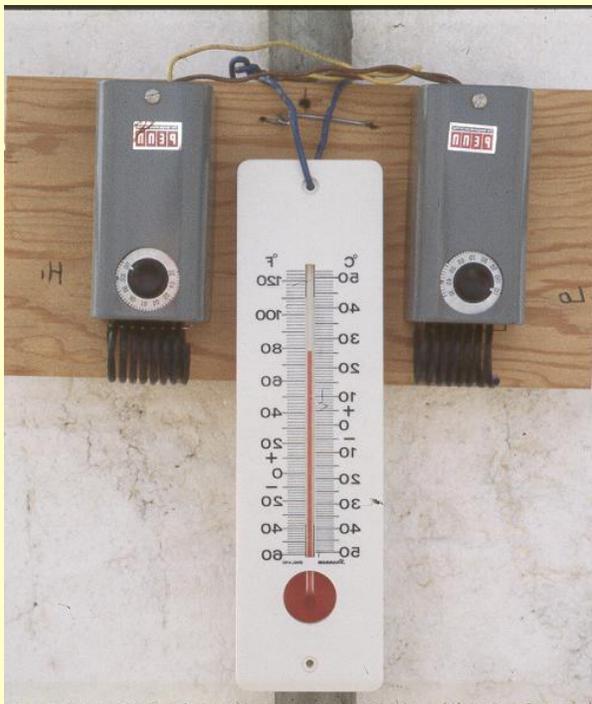
C

Figura 3.1.31 Los termómetros de máxima y mínima ("max-min") (A) miden la temperatura corriente del aire, y también marcan las lecturas superior e inferior para un determinado período de tiempo. Nuevos instrumentos electrónicos tienen sondas que son lo suficientemente pequeñas para medir y registrar la temperatura del medio de cultivo dentro del contenedor (B). Los higrómetros (C), han sido utilizados tradicionalmente en viveros que producen en contenedores para registrar tanto la temperatura del aire como la humedad relativa.



B

Figura 3.1.32 Los termostatos (A), proporcionan la más simple y económica forma de equipamiento para el control de la temperatura. Sistemas de control más sofisticados (B), pueden ser mantenidos precisamente a la temperatura designada, llamada punto preciso, a través de una serie de etapas de calentamiento y de enfriamiento.



A

3.1.6 Conclusiones y Recomendaciones

Aunque el crecimiento de la plántula acontece en un amplio intervalo de temperaturas, los administradores de viveros que producen en contenedor, necesitan identificar aquellas que son óptimas para las diferentes especies y ecotipos que pueden estar cultivando. Las temperaturas óptimas pueden variar con la etapa de desarrollo de la planta, y es crítico el aprender el qué tanta variación en la temperatura puede ser tolerada mientras se produce un cultivo de calidad aceptable. Las guías de temperatura son proporcionadas en los cuadros 3.1.2 y 3.1.3. Si más de una especie será producida en la misma estructura de cultivo, los viveristas deben aceptar un régimen térmico que pueda proporcionar una temperatura aceptable para todo el cultivo.

Las propuestas para el control de la temperatura en viveros que producen en contenedor, variarán con el tipo y ubicación de las estructuras de cultivo, disponibilidad de fuentes de combustible y con el tipo de equipo para la modificación de la temperatura. La información proporcionada en este capítulo, puede ser usada en el diseño de nuevas estructuras de cultivo, o para mejorar la operación de las instalaciones existentes. Aunque la economía dictará cuales opciones son las mejores, el objetivo del administrador de viveros siempre debería ser el optimizar los regímenes térmicos al nivel necesario para producir plántulas de calidad.

3.1.7 Literatura Citada

- Aldrich, R.A.; Bartok, J.W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Ithaca, NY: Cornell University, Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- Acme, 1988. The greenhouse climate control handbook: engineering principles and design procedures. Muskogee. Oh: Arme Engineering and Manufacturing Company. 23 p.
- ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook: fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. 792 p.
- Ball, V. 1985. Ball Red Book: greenhouse growing, 14th ed. Reston Publishing Company. 720 p.
- Barnett, J.P. 1979. Germination temperatures for container culture of southern pines. Southern Journal of Applied Forestry 3(1):13-14.
- Barnett, J.P. 1989. Shading reduces growth of longleaf and loblolly pine seedlings in containers. Tree Planters Notes 40(1):23-26.
- Barnett, J.P.; Brissette, J.C. 1986. Producing southern pine seedlings in containers. Gen. Tech. Rep. SO-59. New Orleans: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 71 p.
- Bartok, J.W., Jr. 1990. Fuel oil. Greenhouse Manager 9(8):91-92.
- Bates, M. E. 1976. Growth responses of containerized southern pine seedling to temperature and light in controlled environment greenhouses. Durham, NC: Duke University. 180 p. Dissertation.
- Brix, H. 1971. Growth response of western hemlock and Douglas-fir seedlings to temperature redimes during day and night. Canadian Journal of Botany 49:289-294.
- Callaham, R.Z. 1962. Geographic variability in growth of forest trees. In: Kozlowski, T.T., ed. Tree growth. New York Press: 311-325.
- Davis, E.A.; Cole, F.D. 1976. Shade material for modifying greenhouse climate. Gen. Tech. Rep. RM-33 Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 6 p.
- Downs, R.J.; Hellmers, H. 1975. Environment and experimental control of plant growth. New York: Academic Press. 145 p.
- Dunlap, J.R.; Barnett, J.P. 1982. Germination characteristics of southern pines as influenced by temperature. In: Guldin, R.W.; Barnett, J.P., eds. Proceedings, Southern Containerized Forest Tree Seedling Conference; 1991 August 25-27; Savannah, GA. Gen. Tech. Rep. SO-37. New Orleans: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station: 33-36.
- Edwards, I.K.; Huber, R.F. 1992. Contrasting approaches to containerized seedling production: 2 The Prairie Provinces. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 123-127.
- Garber, M.P.; Mexal, J.G. 1980. Lift and storage practices: their impact on successful establishment of southern pine plantations. New Zealand Journal of Forestry Science 10:72-82.
- Garzoli, K. 1988. Greenhouses. Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service. 185 p.
- Gonzalez, A.; D'Aoust, A.L. 1988. Observations and measurements of containerized black spruce seedlings growing in a greenhouse. Inf. Rep. LAU-X-79E. Sainte-Foy, PQ: Canadian Forestry Service, Laurentian Forestry Centre. 70 p.
- Gray, H. 1948. A study of the problems of heating, ventilation, and air conditioning greenhouses. PhD thesis. Ithaca, NY: Cornell University.
- Greenwald, S.M. 1972. Some environmental effects on the growth and monoterpene production of *Pinus taeda* L. and *Ocimum basilicum* L. Dissertation. Durham, NC: Duke University.
- Hallett, R.D. 1982. Contrasting approaches to containerized seedling production: 3. The Maritime Provinces. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981

- September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 129-138.
- Hallett, R.D.; Cameron, M.D.; Murray, T.S., eds. 1985. Proceedings, Reforestation in the Maritimes Symposium; 1984 April 3-4; Moncton, NB. Fredericton, NB; Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre. 188 p.
- Hanan, J.3.; Holley, W.D.; Goldsberry, K.L. 1978. Greenhouse management. New York: Springer Verlag. 530 p.
- Hawkins, C.D.B.; Draper, D.A.; Eng, R.Y.N. 1988. Heating system, germination temperature and post germination fertilizar effects on white spruce nursery growth. In: Landis, T.D. tech. coord. Proceedings, Combined meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 August 8-11; Vernon. BC. Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 50-53.
- Heidmann, L.J. 1981. Overcoming temperature dependent dormancy of south western ponderosa pine seed. Res. Note RM-406. Fort - Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 4 p.
- Hellmers. H. 1966. Growth response of redwood seedlings to thermoperiodism. Forest Science 12:276-283.
- Hellmers. H.; Genthe, M.K.; Ronco, V. 1970. Temperature affects growth and development of *Engelmann spruce*. Forest Science 16:447-452.
- Hellmers, H.; Rook. D.A. 1973. Air temperature and growth of radiata pine seedlings. New Zealand Journal of Forestry Science 3(3):271-285.
- Kramer, P.J.; Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.
- Larcher, W. 1975. Physiological plant ecology. New York: Springer-Verlag. 252 p.
- Langhans, R.W. 1980. Greenhouse management, 2nd. ed. Ithaca, NY: Halcyon Press of Ithaca. 270 p.
- Larson, M.M. 1967. Effect of temperature on initial development of ponderosa pine seedlings from three sources. Forest Science 13:286-294.
- Lavender. D.F.; Overton, W.S. 1972. Thermoperiods and soil temperature as they affect growth and dormancy of Douglas-firs seedlings of different geographic origin. Res. Pap. 17, Corvallis, OR: Oregon State University, Forestry Sciences Laboratory. 26 p.
- Lopushinsky, W.; Max. T. 1990. Effect of soil temperature on root and shoot growth and on budburst timing in conifer seed transplants. New Forests 4:107-124.
- Mastalerz, J.W. 1977. The greenhouse environment. New York: John Wiley and Sons. 629 p.
- Matthews, R.G. 1982. Contrasting approaches to containerized seedling production: 1. British Columbia. In: Scarratt, 3.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes - Forest Research Centre: 115-122.
- McLemore, B.F. 1966. Temperature effects on dormancy and germination of loblolly pine seed. Forest Science 12:284-289.
- Mulroy, J. 1972. Some effects of temperature on growth and photosynthesis in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. PhD thesis. Durham, NC: Duke University.
- Nelson, P.V. 1985. Greenhouse operation and management. 3er ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 598 p.
- Odlum, K.F. 1991. Hardening and overwintering container stock in Ontario: practices and research. In: Proceedings, 11th anual conference of the Forest Nursery Association of British Columbia. 1991 September 23-26; Prince George, BC. (in press).
- Olson, J.S.; Stearns, F.W.; Nienstaedt, H. 1959. Eastern hemlock seeds and seedling response to photoperiod and temperature. Bull. 620. Storrs, CT: Connecticut Agricultural Experimental Station.

Orlander, G.; Gemmel, P.; Hunt, J. 1990. Site preparation: a Swedish overview. FRDA Rep. 105. Victoria, BC: Forestry Canada, Pacific Forestry Centre. 62 p.

Owston, P.W.; Kozlowski, T.T. 1978. Effects of temperature and photoperiod on growth of western hemlock. In: Atkinson, W.A.; Zasoski, R.J., eds. Contrib. 34 (May 1976). Seattle: University of Washington Western College of Forest Resources.

Rook, D.A. 1991. Seedling development and physiology in relation to mineral nutrition. In: van den Driessche, R., ed. Mineral nutrition of conifer seedlings. Boston: CRC Press: 85.111.

Schroeder, M.J.; Buck, C.C. 1970. Fire Weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. USDA Agric. Handbk. 360. Washinton, DC: USDA Forest Service. 229 p.

Stathers, R.J.; Spittlehouse, D.L. 1990. Forest soil temperature manual. Victoria, BC: Forestry Canada/BC Ministry of Forests. 47 p.

Thompson, B. 1902. Environmental control over the shoot growth of pine seedlings. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 177-181.

Tinus, R.W. 1962. Environmental control of seedling In: Scarratt, J.B.; Glerum, L.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 75-82.

Tinus, R.W. 1984. Optimum temperatures for growth of southern Rocky Mountain Engelmann spruce and Douglas-fir seedlings. Res. Note RM-442. Ft. Collins, CO:USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 5 p.

Tinus, R.W.; McDonald, S.E. 1979. How to grow tree seedlings in containers in greenhouses. Gen. Tech. Rep. RM-60. Ft. Collins, CO:USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 256 p.