



MANUAL DE VIVEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN CONTENEDOR • VOLUMEN TRES

CONDICIONES AMBIENTALES DEL VIVERO



Volumen Uno	Planeación, Establecimiento y Manejo del Vivero (1995)
Volumen Dos	Contenedores y Medios de Crecimiento (1990)
Volumen Tres	Condiciones Ambientales del Vivero (1992)
Volumen Cuatro	Fertilización y Riego (1989)
Volumen Cinco	El Componente Biológico: Plagas, Enfermedades y Micorrizas en el Vivero (1990)
Volumen Seis	Propagación de Plantas (1999)
Volumen Siete	Preparación de la Planta, Almacenamiento y Plantación (2010)

Landis, T.D.; Tinus, R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. 1992.
Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en
Contenedor. Volumen 3. Condiciones Ambientales del Vivero.
Manual agrícola 674. Washington, D.F.
Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
(USDA-FS) 152 p.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) prohíbe la discriminación en todos sus programas y actividades, en términos de raza, color, nacionalidad, género, religión, edad, discapacidad, afinidad política, orientación sexual, situación marital o estatus familiar (no todos los términos prohibidos aplican para todos los programas). Personas con discapacidad que requieren medios alternativos de comunicación respecto de información de programas (Braille, impresiones de gran formato, audio cintas, etc.) deberán establecer comunicación con el Centro USDA TARGET al (202) 720-2600 (voz y TDD). El USDA proporciona igualdad de oportunidades y empleo.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

Servicio Forestal

Manual Agrícola 674

Publicación en Inglés: Mayo, 1999

Publicación en Español: Octubre, 2013



Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor

Volumen Tres

Condiciones Ambientales del Vivero



Thomas D. Landis, Especialista Nacional en Viveros. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Bosques Estatales y Privados. Portland, Oregon E.U.A.

Richard W. Tinus, Fisiólogo Vegetal, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio Forestal. Estación Experimental del Sur, Flagstaff, Arizona, E.U.A.

Stephen E. McDonald, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Gerente de Programa. Estación Experimental Forestal del Pacífico Noroeste. Portland, Oregon E.U.A.

James P. Barnett, Supervisor Principal en Silvicultura. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio Forestal, Estación Experimental del Sur, Pineville, LA, E.U.A.

Rebeca G. Nisley, Editor. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Oficina de Relaciones Públicas. Washington D.C.



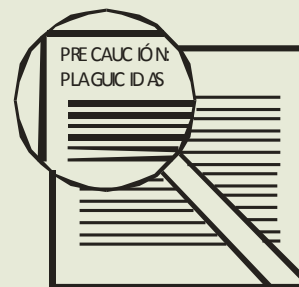
Dante Arturo Rodríguez Trejo, Profesor Investigador, División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México). Traducción libre del inglés al español.

José Ricardo Sánchez Velázquez (Consultor Forestal-Guadalajara, Jal. México). Verificación de terminología técnica, edición, corrección de estilo, revisión final y formación de archivos digitales, Zapopan, Jalisco, México.

¡PRECAUCIÓN: PLAGUICIDAS!

Esta publicación refiere investigaciones que involucran plaguicidas. Todo uso de plaguicidas debe ser registrado, con antelación a su recomendación, por las agencias federales y/o estatales correspondientes.

PRECAUCIÓN: Los plaguicidas pueden ser dañinos para personas, animales domésticos, plantas deseables, peces y vida silvestre en general, si éstos no son manejados o aplicados apropiadamente. Use todos los plaguicidas selectiva y cuidadosamente. Siga las prácticas recomendadas tanto para la disposición de excedentes de plaguicidas como de sus contenedores.



Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor

Volumen Tres Condiciones Ambientales del Vivero

Contenido

Pág.

Capítulo 1 – Temperatura.....	1
3.1.1 Introducción	3
3.1.2 Papel de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas	5
3.1.3 Niveles óptimos de temperatura	10
3.1.4 Modificando la temperatura en los viveros que producen en contenedor	17
3.1.5 Monitoreo de la temperatura y sistemas de control.....	39
3.1.6 Conclusiones y recomendaciones	42
3.1.7 Literatura citada	43
Capítulo 2 – Humedad	47
3.2.1 Introducción	49
3.2.2 Papel de la humedad en el crecimiento y desarrollo de las plantas.....	54
3.2.3 Niveles óptimos de humedad	58
3.2.4 Modificando la humedad en los viveros forestales que producen en contenedor	61
3.2.5 Sistemas de monitoreo y de control de la humedad	66
3.2.6 Conclusiones y recomendaciones	70
3.2.7 Literatura citada	71
Capítulo 3 – Luz	73
3.3.1 Introducción	75
3.3.2 Papel de la luz en el crecimiento y desarrollo de plantas de árboles.....	80
3.3.3 Niveles óptimos de luz.....	93
3.3.4 Modificando la luz en los viveros forestales que producen en contenedores	98
3.3.5 Sistemas de monitoreo y control de luz.....	118
3.3.6 Conclusiones y recomendaciones	121
3.3.7 Literatura citada	122

Capítulo 4 – Dióxido de Carbono	127
3.4.1 Introducción	129
3.4.2 Papel del dióxido de carbono en el crecimiento y desarrollo de las plantas de árboles	131
3.4.3 Niveles óptimos de dióxido de carbono	135
3.4.4 Modificando el dióxido de carbono en los viveros forestales que producen en contenedores	138
3.4.5 Sistemas de monitoreo y control de dióxido de carbono	143
3.4.6 Conclusiones y recomendaciones	145
3.4.7 Literatura citada	146
Apéndice.....	148
Índice de nombres científicos	150

Agradecimientos

La culminación de este volumen fue posible gracias a la participación y el apoyo de gente e instituciones comprometidas con las acciones de rehabilitación forestal.

Especial agradecimiento a:

- El **Servicio Forestal** del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (**USDA-FS**).
- **Tom Landis** por su invaluable apoyo como autor principal del Manual y por proveer los archivos originales de las fotografías y gráficos. Así mismo, se reconoce su entusiasta participación en acciones de viveros y reforestación en nuestro país.
- **George Hernández** por su apoyo permanente como parte del Servicio Forestal de los Estados Unidos con acciones desinteresadas para colaborar con las acciones de restauración forestal en México.
- **Dante A. Rodríguez Trejo, José Ricardo Sánchez Velázquez y Silvia M. García Godínez** por su apoyo y participación desinteresada como equipo de traducción, revisión de terminología técnica, corrección de estilo, edición y formación de archivos digitales.
- **Reverdece, A.C.**, asociación sin fines de lucro, comprometida con el cuidado, fomento y conservación de los recursos naturales, por impulsar la búsqueda de apoyos intergubernamentales para la traducción e impresión del presente manual.

Blanco

Prefacio

El trabajo para elaborar el primer manual técnico referente a la producción de plantas de especies forestales en contenedor, intitulado "Cómo cultivar plantas de especies forestales en contenedor en invernaderos" (*"How to grow tree seedling in containers in greenhouses"*), fue iniciado en junio de 1975 por Richard W. Tinus y por Stephen E. McDonald, y fue publicado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, como Reporte General Técnico (GTR RM-60), en mayo de 1979. Este manual alcanzó gran aceptación en todo el mundo como primera referencia para el cultivo de plantas de especies forestales en contenedor. Dicho trabajo fue realizado originalmente como una publicación de uso interno, y ha sido reimpresso muchas veces; sin embargo, en la actualidad se dejó de reimprimir.

En 1982, se inició la planeación para escribir un nuevo manual fundamentado en la obra referida, pero agregando varios capítulos nuevos. El equipo de autores se integró con Thomas D. Landis, Richard W. Tinus, Stephen E. McDonald, y James P. Barnett, con el apoyo de Rebecca G. Nisley como jefa de redacción. Otros autores fueron invitados para escribir capítulos específicos, y sus contribuciones fueron reconocidas en las portadillas de los capítulos individuales.

Considerando que el manejo de los viveros de contenedores ha cambiado considerablemente durante la última década, el equipo de trabajo realizó una encuesta sobre las prácticas de los viveros de contenedor en Norteamérica en 1984. Para obtener información adicional para el volumen tres, sobre cómo los viveros regulan el ambiente, los viveros fueron nuevamente encuestados a principios de 1991. La información obtenida en estas encuestas sirvió de soporte para determinar las prioridades y el énfasis de la escritura del trabajo, y ha sido utilizada para complementar la literatura ya publicada.

El Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor consta de siete volúmenes; han sido publicados en el mismo orden en que fueron escritos, todos bajo el mismo número de serie – el Manual Agrícola 674 del Departamento de Agricultura de los

Estados Unidos. Cada volumen contiene capítulos sobre aspectos estrechamente relacionados, relativos a la producción de especies forestales en contenedor. Los volúmenes pueden ser acumulados y utilizados como un manual completo de viveros, o pueden ser usados en forma separada por especialistas que requieren información sobre un tema en particular. Debido a que varios temas son discutidos en más de un volumen, podría existir alguna redundancia en el manual. No obstante, tal repetición está justificada ya que muchos lectores usarán este manual como referencia técnica y no leerán el manual en su totalidad.

Este manual ha sido estructurado de manera funcional, siguiendo una secuencia normal desde el establecimiento del vivero, la propagación de plantas y la plantación. En el Volumen uno se discuten las diferentes etapas que deben seguirse para el desarrollo de las instalaciones del vivero. El Volumen dos aborda la importancia de la selección de los tipos de contenedor y los sustratos. En los Volúmenes tres y cuatro se analizan los "factores limitantes" que afectan el crecimiento de las plántulas, y se discute cómo éstos pueden ser manipulados en los viveros que utilizan contenedores. En el Volumen cinco se analizan los diversos organismos biológicos que pueden afectar a las plantas, tanto negativamente como las plagas, o positivamente como las micorrizas. En el Volumen seis se muestra cómo desarrollar la programación de la producción y como son propagadas las plantas a través de las tres fases de crecimiento. En el Volumen siete se discute cómo deben ser procesadas, almacenadas, y manejadas las plantas, tanto en el vivero como en el sitio de plantación.

Los siete volúmenes están estructurados en torno a un esquema de organización numérica de títulos de los capítulos, lo que facilita al lector la rápida localización de un tema específico sin necesidad de referirse al índice. El esquema general de los volúmenes y los títulos de los capítulos es como sigue:

Volumen Uno. Planeación, Establecimiento y Manejo

Capítulo 1. Planeación Inicial y Estudio de Factibilidad

- Capítulo 2. Selección del Sitio
- Capítulo 3. Plano del Sitio y Diseño del Vivero
- Capítulo 4. Control Ambiental y Equipo para la Producción de Plantas
- Capítulo 5. Manejo del Vivero
- Capítulo 8. Identificación y Control de Problemas en la Producción en Contenedores

Volumen Dos. Contenedores y Medios de Crecimiento

- Capítulo 1. Contenedores: Tipos y Funciones
- Capítulo 2. Medios de Crecimiento

Volumen Tres. Condiciones Ambientales del Vivero

- Capítulo 1. Temperatura
- Capítulo 2. Humedad
- Capítulo 3. Luz
- Capítulo 4. Dióxido de Carbono (CO₂)

Volumen Cuatro. Fertilización y Riego

- Capítulo 1. Nutrientes Minerales y Fertilización
- Capítulo 2. Riego y Manejo del Agua

Volumen Cinco. El Componente Biológico: Plagas, Enfermedades y Micorrizas en el Vivero

- Capítulo 1. Manejo de Plagas y Enfermedades
- Capítulo 2. Micorrizas

Volumen Seis. Propagación de Plantas

- Capítulo 1. Planeación del Cultivo
- Capítulo 2. Propagación por Semilla
- Capítulo 3. Propagación Vegetativa
- Capítulo 4. Desarrollo de la Planta: Fases de Establecimiento, Rápido Crecimiento y Endurecimiento

Volumen Siete. Preparación de la Planta, Almacenamiento y Plantación

- Capítulo 1. El Concepto de la "Planta Objetivo"
- Capítulo 2. Evaluación de la Calidad de la Planta
- Capítulo 3. Cosecha
- Capítulo 4. Almacenamiento de Planta
- Capítulo 5. Manejo y Transporte
- Capítulo 6. Plantación

El manual está basado en los actuales y mejores conocimientos del manejo de viveros forestales que utilizan contenedores, y debe ser usado como una referencia general. Las recomendaciones fueron hechas utilizando la mejor información disponible al momento, y estarán por lo tanto, sujetas a revisión en la medida que exista un mayor conocimiento. La

mayoría de la información de este manual fue desarrollada para plantas de coníferas del oeste y sur de los Estados Unidos. Aunque los autores intentaron incluir información de especies procedentes de otras regiones geográficas, debido a la amplia variación de la respuesta de especies individuales, los viveristas necesitarán adaptar estos principios y procedimientos, a la situación de su propio vivero. No existe sustituto para la experiencia individual, de modo que las prácticas culturales recomendadas deben ser probadas antes de ser instrumentadas a una escala operacional.

En el manual se refieren nombres de productos comerciales, pero sólo son proporcionados como ejemplos, y no se pretende la recomendación de productos específicos, o la exclusión de otros igualmente adecuados. La mención de plaguicidas específicos se provee solamente como información general y no debe ser interpretada como una recomendación. Debido a los frecuentes cambios en el registro y etiquetado de los plaguicidas, el lector debe verificar con las autoridades locales si el uso deliberado del producto es, tanto seguro como legal. Recuerde que los plaguicidas pueden ser perjudiciales para los seres humanos, animales domésticos, plantas deseables, peces y otros animales silvestres, si éstos no son manejados o aplicados apropiadamente. Use todos los plaguicidas selectiva y cuidadosamente, siguiendo las instrucciones de la etiqueta. Siga las prácticas recomendadas para la disposición de los excedentes y los envases de los plaguicidas.

El manual fue organizado en volúmenes separados lo cual permite revisiones y actualizaciones. Los autores solicitan a los lectores señalar cualquier error en el texto para su consideración, así como proveer sugerencias para su mejora. Cualquier sugerencia puede ser remitida a Thomas D. Landis, USDA-Forest Service, State and Private Forestry, PO Box 3623, Portland, OR 97208, USA; enviar correo electrónico a:

nurseries@aol.com

Reconocimientos

Mucha gente ha sido fundamental en la preparación del manual. La revisión técnica de tan voluminosa publicación implica un trabajo considerable, de modo que los autores agradecen a los siguientes especialistas de viveros por la revisión de las versiones preliminares de los siguientes capítulos de este volumen:

Capítulo 1. Temperatura

- Dr. Eugene Shoulders, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación sureña, Alexandria, LA.
- Dr. William C. Carlson, Centro Tecnológico Weyerhaeuser, Federal Way, WA.
- Mr. Eric van Steenis, Ministerio Forestal de la Columbia Británica, Surrey, BC, Canadá.

Capítulo 2. Humedad

- Dr. Boyd Strain, Universidad de Duke, Durham, NC.
- Dr. Merrill Kaufmann, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación de las Montañas Rocosas, Ft. Collins, CO.
- Dr. Leroy J. Heidmann, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación de las Montañas Rocosas, Flagstaff, AZ.
- Dr. William Lopushinsky, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación del Pacífico Noroeste, Wenatchee, WA.
- Mr. Eric Van Steenis, Ministerio Forestal de la Columbia Británica, Surrey, BC, Canadá.

Capítulo 3. Luz

- Dr. James T. Arnott, Servicio Forestal Canadiense, Centro Forestal del Pacífico. Victoria, BC, Canadá.
- Mr. Eric van Steenis, Ministerio Forestal de la Columbia Británica, Surrey, BC, Canadá.

Capítulo 4. Dióxido de Carbono

- Dr. Boyd Strain, Universidad Duke, Durham, NC.
- Dr. Merrill Kaufmann, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación de las Montañas Rocosas, Ft. Collins, CO.

- Dr. Leroy J. Heidmann, Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Estación de las Montañas Rocosas, Flagstaff, AZ.
- Dr. Kenneth L. Goldsberry, Departamento de Horticultura, Universidad Estatal de Colorado, Ft. Collins. CO.

¿Dónde se pueden obtener copias?

El Servicio Forestal adquirió inicialmente una cantidad limitada de copias de impresiones físicas, de cada volumen para su distribución gratuita, sin embargo, muchos de los volúmenes anteriores están agotados. Debido al costo de reimpresión a color, la empresa Stuewe and Sons ha reimpresso los volúmenes en blanco y negro. Todos los volúmenes también han sido publicados como Libros Electrónicos (e-books), en formato de Adobe PDF. Ambas, tanto las impresiones físicas como los e-books pueden ser adquiridas de las siguientes fuentes; contáctelas para disponibilidad y precios.

Western Forestry and Conservation Association
4033 SW Canyon Road
Portland, OR 97221 USA
Tel. 503-226-4562, Fax: 503-226-2515
E-mail: richard@westernforestry.org
Web site: <http://www.westernforestry.org>

Stuewe & Sons
31933 Rolland Drive
Tangent, OR 97389 USA
Tel. 1-800-553-5331 o 541-757-7798
Fax: 541-754-6617
E-mail: info@stuewe.com
Web site: <http://www.stuewe.org>

Adicionalmente, los documentos en formato PDF pueden ser visualizados y descargados del sitio web de Reforestación, Viveros y Recursos Genéticos (Reforestation, Nurseries and Genetics Resources): <http://rngr.net>



MANUAL DE VIVEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN CONTENEDOR

VOLUMEN 3

Condiciones Ambientales del Vivero

Introducción

■ Introducción

En este volumen del Manual, se discuten los cuatro factores atmosféricos del ambiente de los viveros que producen en contenedores, temperatura, humedad, luz y dióxido de carbono, que controlan directamente la tasa de crecimiento de un cultivo de especies forestales. Los otros dos factores importantes, agua y nutrientes minerales, son provistos por el medio de cultivo. Estos últimos factores son discutidos en el volumen cuatro del manual: Nutrición de las plántulas y riego.

Como se explica en el volumen uno, las plantas son cultivadas en viveros de forma que los diversos factores que afectan su crecimiento y desarrollo sean mantenidos tan cerca de los niveles óptimos como sea posible. El principio de los factores limitativos (Blackman, 1905), establece que cuando un proceso es gobernado por varios factores, su tasa es limitada por el factor que está más cercano al requerimiento mínimo. El significado práctico es que, aunque los cuatro factores atmosféricos (luz, temperatura, humedad y dióxido de carbono) son necesarios para el crecimiento, usualmente es uno el que limita el sistema en algún momento (Kramer y Kozlowski, 1979).

Aunque son discutidos por separado, estos cuatro factores deben siempre ser considerados conjuntamente, pues se interaccionan entre sí en el control del crecimiento de las plántulas (Fig. 3.1.1). Un buen ejemplo de estas interrelaciones son la humedad y temperatura. La humedad del aire comúnmente se mide con la humedad relativa, y su valor cambia drásticamente con los cambios en la temperatura.

Quizá el mejor ejemplo de la extrema complejidad de la interrelación entre los cuatro factores atmosféricos es la fisiología de una hoja típica (Fig. 3.1.2). Los dos gases (dióxido de carbono y vapor de agua) y la luz, están involucrados en la fotosíntesis, la respiración y la transpiración:

- En la fotosíntesis se utiliza dióxido de carbono, y se produce oxígeno.
- En la respiración se utiliza oxígeno, y se produce dióxido de carbono.
- La transpiración es la pérdida de agua a través de los estomas.

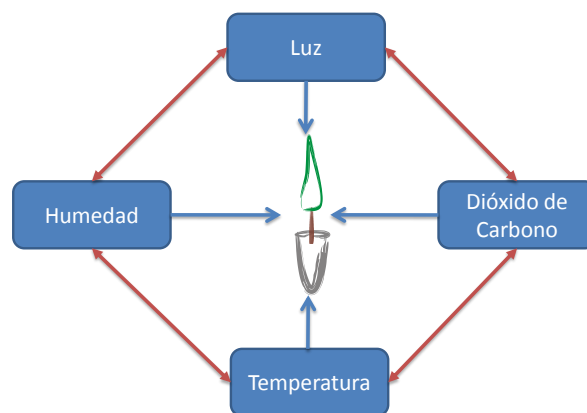


Figura 3.1.1 Factores atmosféricos que afectan el crecimiento de las plántulas de especies forestales.

Los tres procesos fisiológicos están regulados por la temperatura de la hoja y por el funcionamiento de los estomas, que responde a las concentraciones de dióxido de carbono, y la intensidad de la luz, además de los niveles de humedad y la temperatura. Los estomas se abren como respuesta a niveles favorables de luz, dióxido de carbono y humedad, y se mantienen abiertos hasta que las pérdidas de vapor de agua por la transpiración originan la pérdida de presión de turgencia de las células estomáticas. La demanda transpiracional es primariamente una función de la temperatura y de la humedad. La fotosíntesis requiere que los estomas se mantengan abiertos tanto tiempo como sea posible, para permitir que el dióxido de carbono entre, pero en tanto los estomas se mantienen abiertos, ocurren pérdidas de vapor de agua (Roberts, 1990).

Este ejemplo básico ilustra tanto la complejidad extrema de los procesos fisiológicos que controlan el crecimiento vegetal, como las interrelaciones que existen entre éstos y los factores ambientales limitativos.

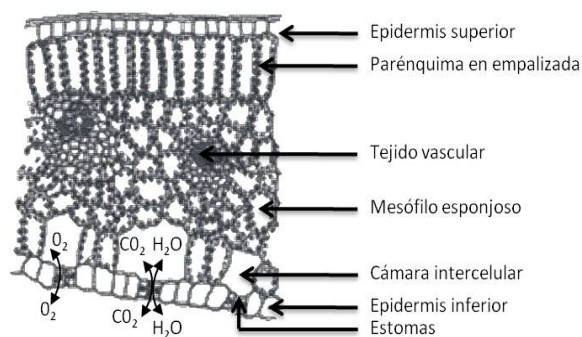


Figura 3.1.2 Sección transversal de una hoja típica, mostrando los diferentes tipos de tejidos y células y los sitios de intercambio gaseoso (de Hartman, Flocker y Kofranek (R), 1981. *Plant Science: growth, development, and utilization of cultivated plants*. p.32. Reimpreso con permiso de Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., E.U.A.).

Por conveniencia, cada uno de los cuatro factores atmosféricos será discutido por separado, pero la organización en cada uno de los capítulos siguientes es la misma, para permitir una fácil comparación.

- **Introducción.** En ella se discuten los conceptos básicos, terminología, y las unidades de medición.
- **Papel en el Crecimiento y Desarrollo de las Plántulas de Especies Forestales.** Aquí se explican cómo estos conceptos pueden ser aplicados en el manejo de viveros que producen en contenedores.
- **Niveles óptimos.** En esta parte se analizan las recomendaciones de la literatura, y se relacionan con lo que se está haciendo en otros viveros que producen en contenedores.
- **Modificando los Factores en el Vivero Forestal que Produce en Contenedores.** Aquí se discute cómo las estructuras y el equipo para el control ambiental, en el vivero que produce en contenedores, pueden ser utilizados para mantener los factores en niveles óptimos.
- **Sistemas de Control y de Monitoreo.** Explica los tipos de equipo de monitoreo y de sistemas para el control ambiental que están disponibles, y que están siendo usados en los viveros.

Al seguir cualquier recomendación, el lector debe recordar y estar prevenido, en que los seis factores están intrincadamente interrelacionados. Un administrador de viveros prudente, considerará las implicaciones antes de cambiar cualquiera de los factores ambientales que afectan el crecimiento de las plántulas, y si es posible, deberá tratar primero a pequeña escala cualquier cambio que tenga en mente.

Literatura citada

Blackman, F. F. 1905. Optima and limiting factors. *Annals of Botany* 19:281-295.

Kramer, P. J.; Kozlowski, T. T. 1979. *Physiology of woody plants*. Berlin: Academic Press. 811 p.

Roberts, B. R. 1990. What are stomates and how do they work? *Journal of Arboriculture* 16(12):331.

Blanco



**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).

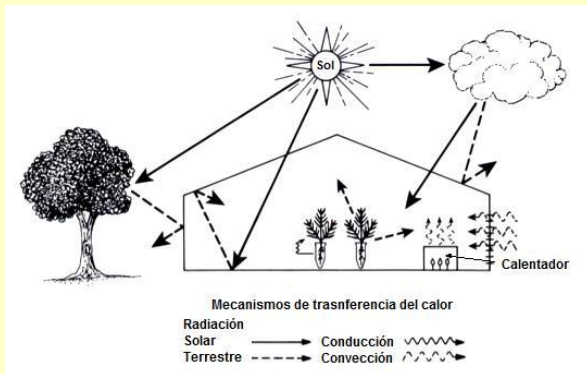


Figura 3.1.1 Intercambio de energía térmica en el ambiente del invernadero.

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 del medio de cultivo (Calor "sensible") transpiración, consumen calor latente en el ambiente de invernadero, porque la transpiración es esencialmente evaporación bio-regulada.

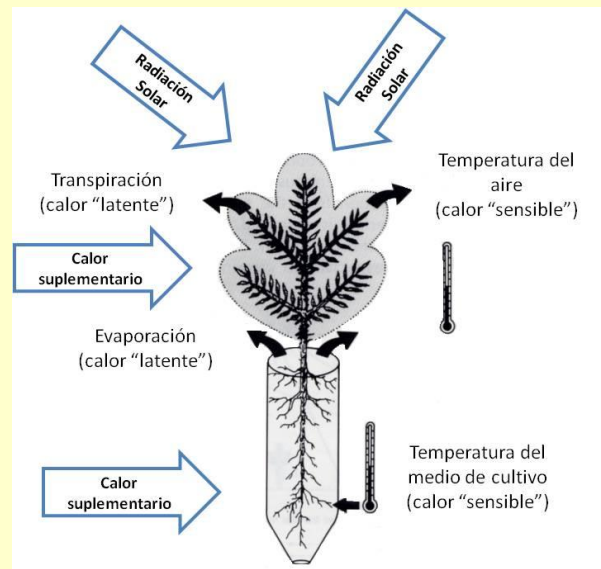


Figura 3.1.2. Intercambio de energía térmica en el microambiente del invernadero.

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).

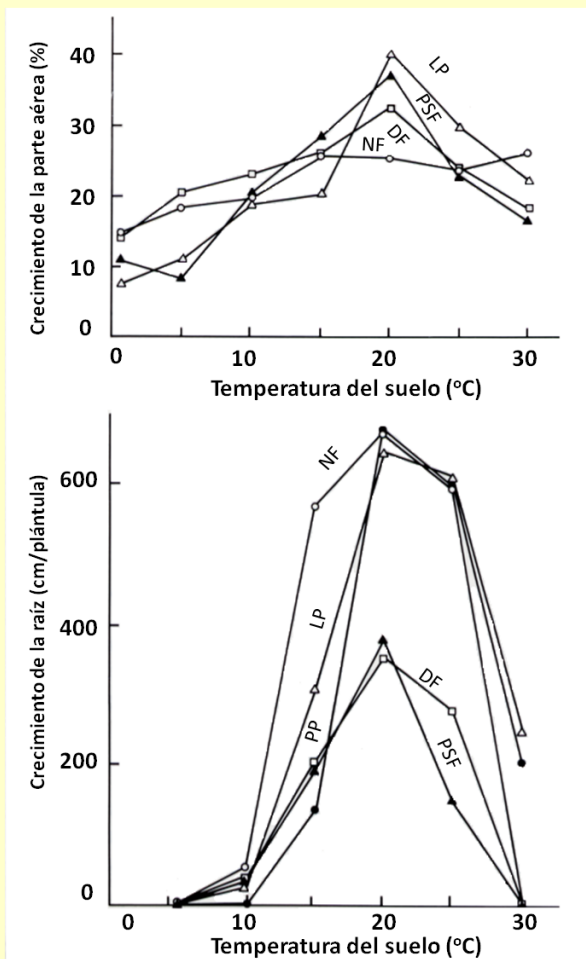


Figura 3.1.3 La temperatura del suelo influye en el crecimiento de la parte aérea y de la raíz, y la respuesta varía entre especies distintas. NF = *Abies procera* Rehd., LP = *Pinus contorta* Dougl. ex Loud., PF = *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws., DF = *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, PSF =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

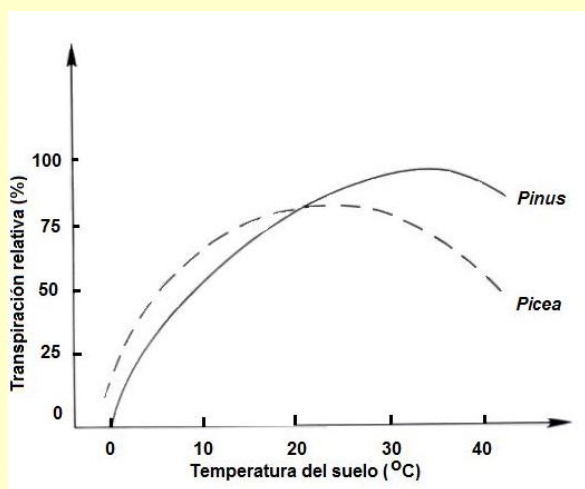


Figura 3.1.4 La fisiología de la parte aérea, es dependiente del funcionamiento del sistema radical. En este ejemplo, la transpiración aumenta con la temperatura, conforme el medio de cultivo se calienta, hasta que las temperaturas nocturnas causan severa tensión hídrica. Note que las especies responden 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).

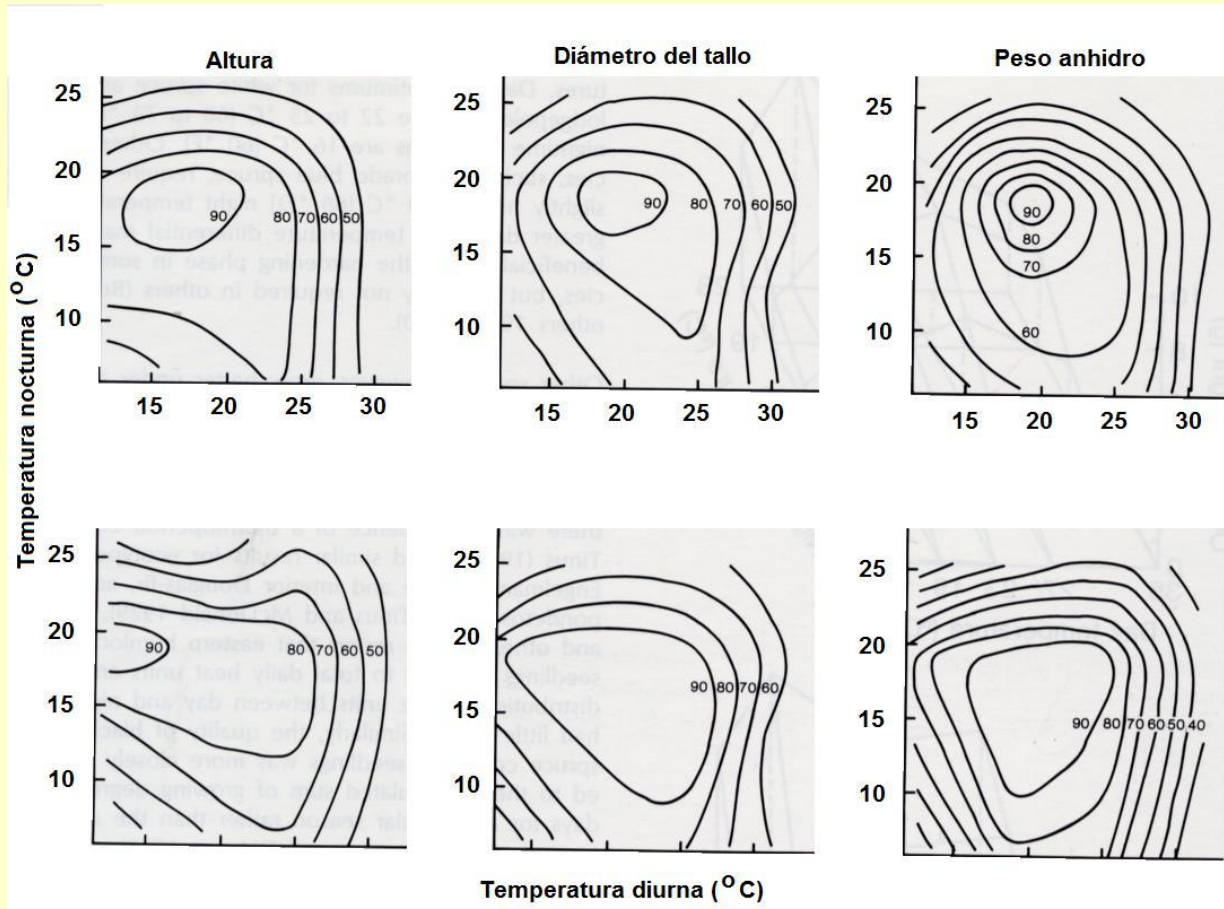


Figura 3.1.5 Dos ecotipos de *Picea engelmannii*, uno del Bosque Nacional Lincoln, en Nuevo México, E.U.A. (parte superior), y el otro del Bosque Nacional Apache-Sitgreaves, en Arizona, E.U.A. (parte inferior), mostraron diferentes patrones de crecimiento en la altura del tallo, su diámetro del tallo, 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).

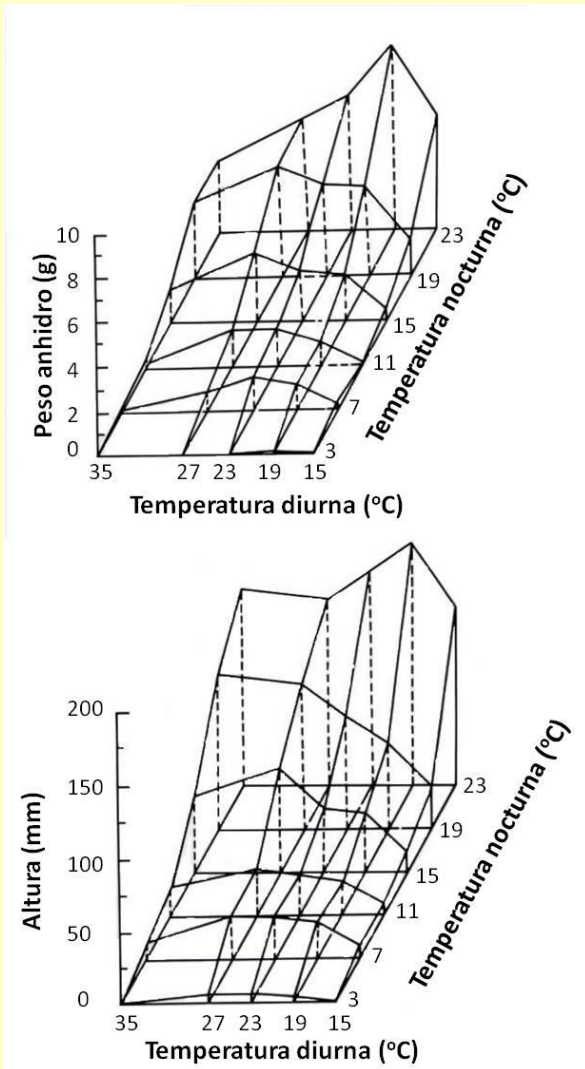


Figura 3.1.6 Tanto la biomasa (peso anhidro), como la altura de estas plántulas de *Picea engelmannii*, aumenta significativamente con las temperaturas de cultivo. Las elevadas temperaturas estimulan un crecimiento en altura excesivo, el cual frecuentemente resulta en plántulas con proporciones parte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

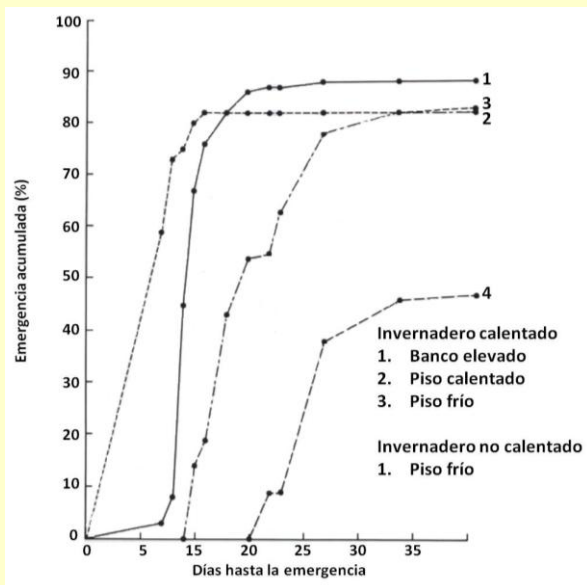


Figura 3.1.9 La emergencia total de las plántulas de *Picea mariana* fue significativamente mayor en un vivero calentado que en uno no calentado, y la tasa de emergencia resultó mucho más rápida sobre un banco elevado caliente o sobre piso calentado, que sobre el piso frío (modificado de Hallett *et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

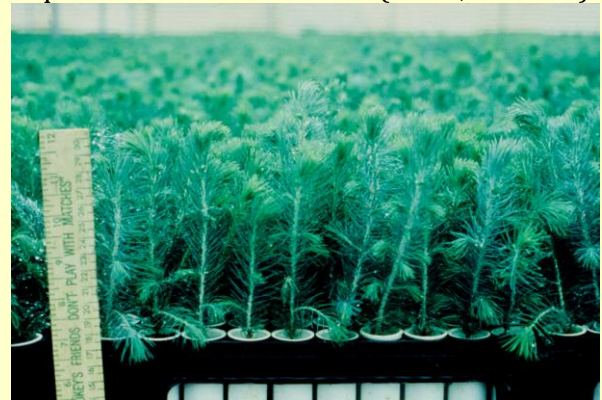


Figura 3.1.10 Durante la fase de crecimiento rápido, los tallos de las plántulas en contenedores crecen a una tasa exponencial, cuando las temperaturas del aire y del medio de cultivo son óptimas.

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).

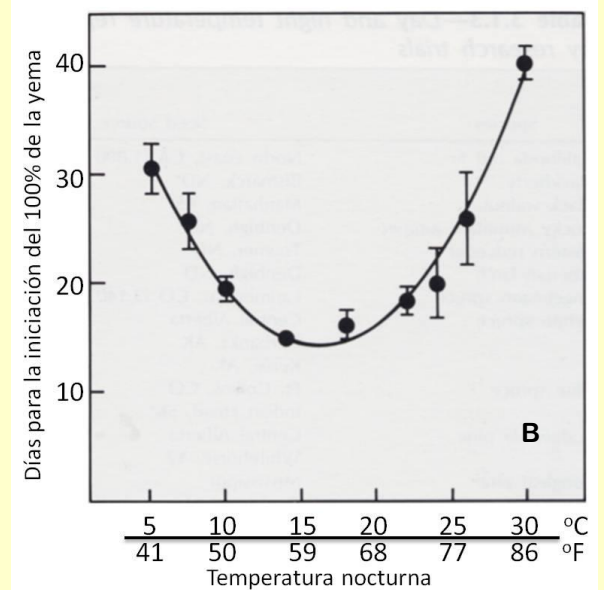


Figura 3.1.11 Las plántulas deben ser inducidas a detener su crecimiento en altura y a producir una yema terminal (A) al comienzo de la fase de endurecimiento. La temperatura puede tener un efecto significativo en el desarrollo de la yema. Por ejemplo, la tasa de iniciación de la yema en las plántulas 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).

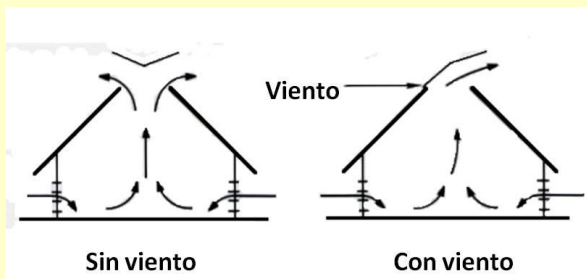


Figura 3.1.13 La ventilación convectiva, utiliza ventilas en la parte superior y lados, para crear una columna convectiva, con el propósito de facilitar la entrada de aire frío por los lados, y permitir la salida del aire caliente por la parte superior (izquierda). Con vientos superiores a 10 km/h (6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

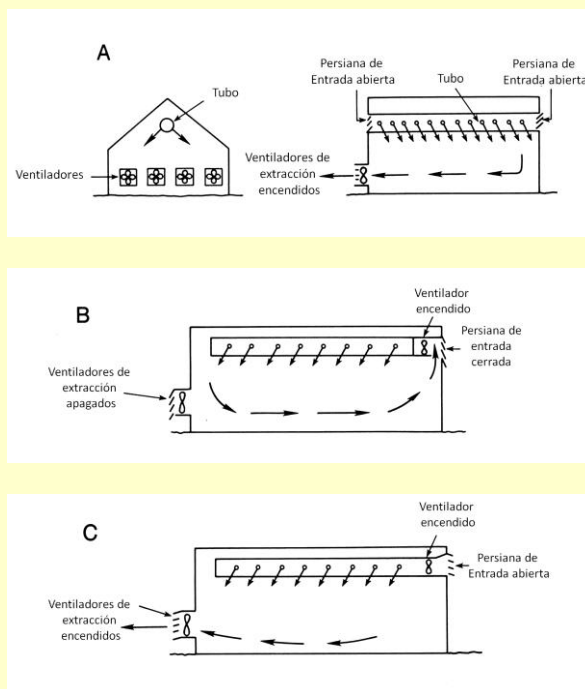


Figura 3.1.17 Los sistemas de ventilación con ventiladores a propulsión (A), usan ventilas con persianas y ventiladores de extracción, además de tubos de ventilación, para promover un mejor intercambio de aire. Con las persianas de entrada cerradas (B), un sistema de ventiladores a propulsión recircula 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).

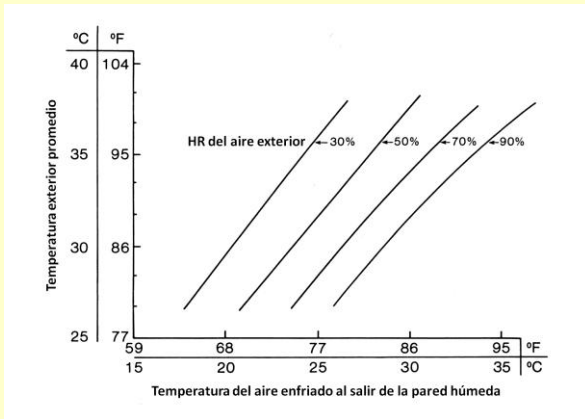
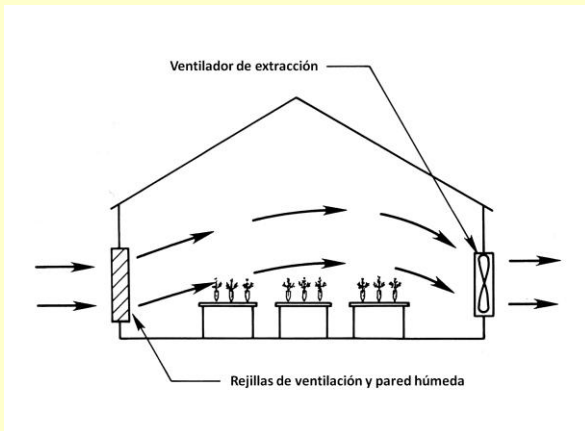


Figura 3.1.18 Los sistemas de enfriamiento evaporativo, son más eficientes en climas secos porque la proporción del enfriamiento aumenta con la depresión del bulbo húmedo, la cual es función de la humedad relativa (HR) y de la temperatura (modificado de Aldrich y Bartok, 1989).

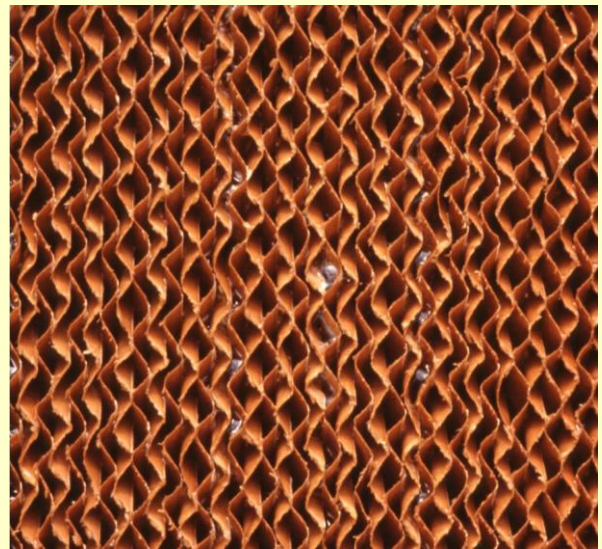
Los sistemas de enfriamiento evaporativo son comunes en los viveros forestales de climas cálidos y secos, que producen en invernaderos, y el más popular es el sistema de ventilador y almohadilla. Los ventiladores de extracción fueron discutidos en la sección previa de ventilación con ventiladores. Las 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



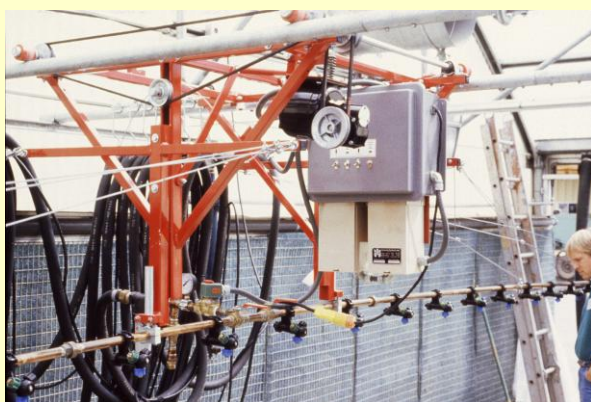
B

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.

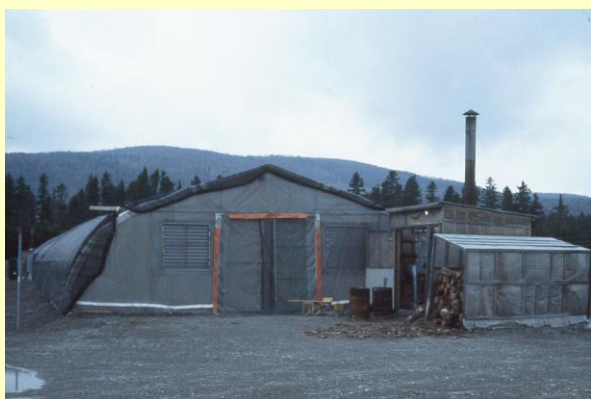


Figura 3.1.24 El calentamiento con madera es una alternativa natural para los viveros forestales, puesto que la madera está fácilmente disponible y es barata en muchas localidades.

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:

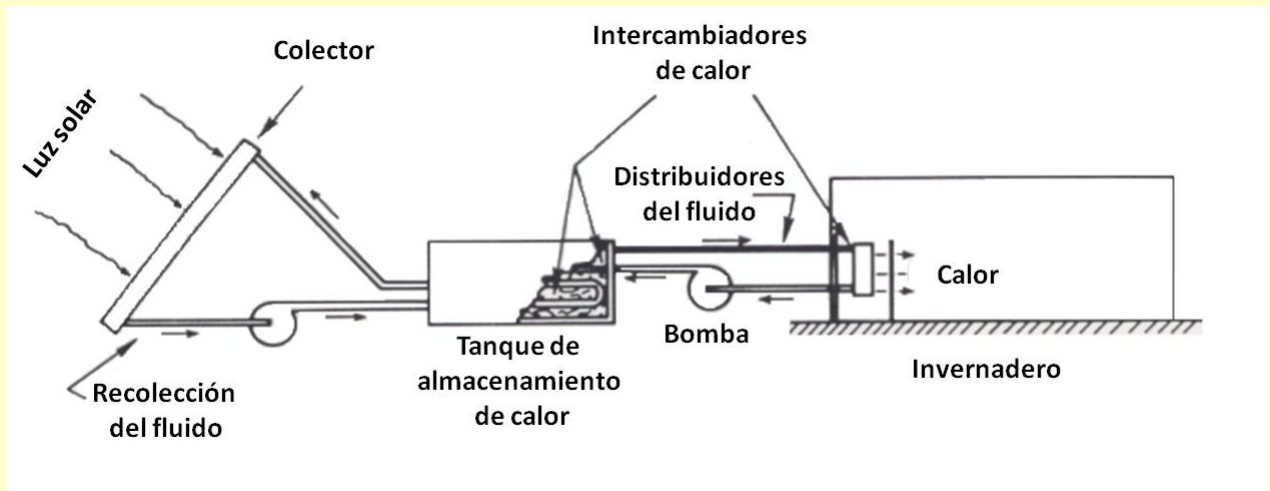
Calor de desecho. Algunos viveros forestales se han adaptado para utilizar el calor generado en otras industrias para el cultivo de plántulas forestales (Cuadro 3.1.8). Como ejemplo, por cada mil millones (1 billón americano) de Kilocalorías que son convertidas a electricidad en plantas generadoras, 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



B

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).

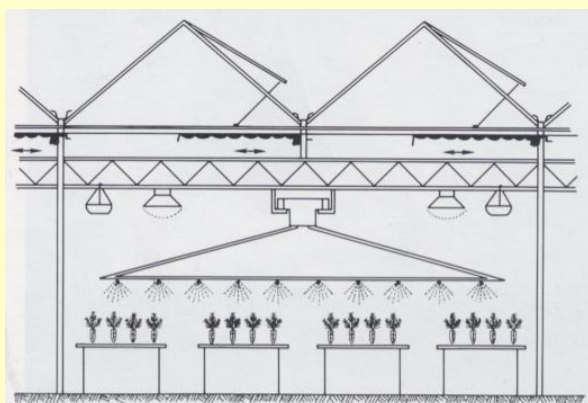
El agregar aislamiento, especialmente abajo de la altura de las camas de cultivo, y sobre las paredes con exposición norte (Fig.3.1.20A), puede ser efectivo para retardar las pérdidas de calor. Se ha demostrado mediante pruebas que una pérdida neta de luz solar acontece a través de la pared norte de 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.

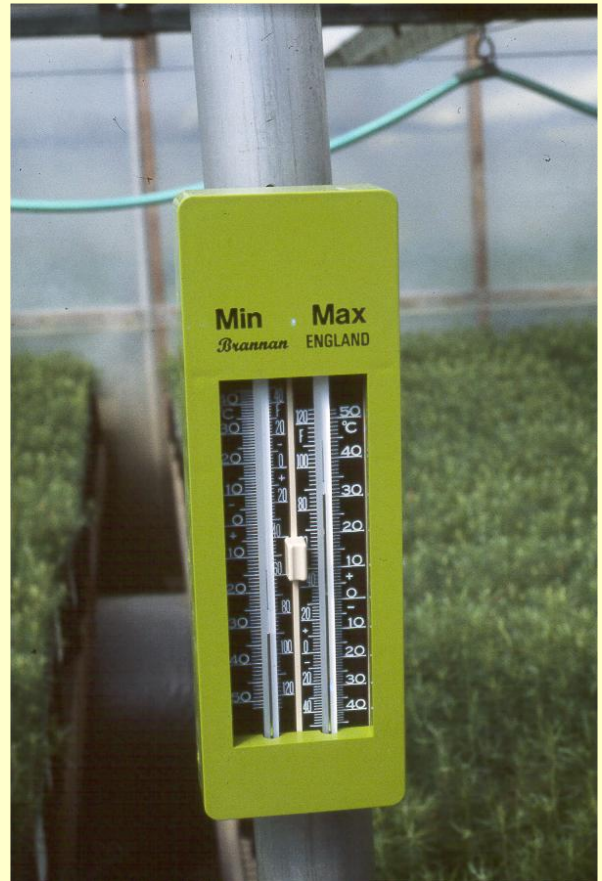
Muchos invernaderos modernos son ajustados con equipos electrónicos de control sofisticado, que monitorean temperatura y muchos otros factores ambientales.

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

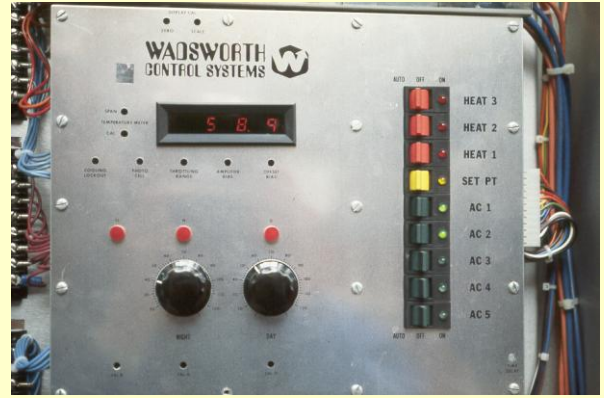


B



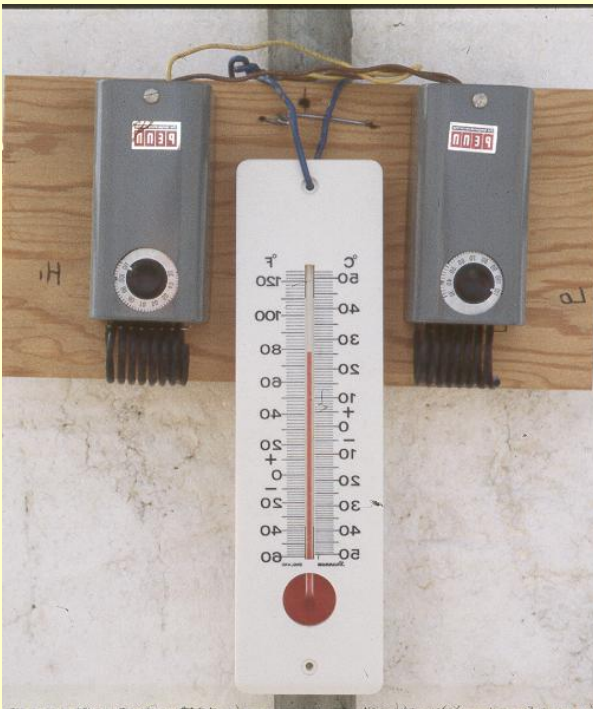
C

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 higrómetrografos (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.



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

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 2
Humedad**

Contenido

3.2.1 Introducción	X
3.2.1.1 Biofísica del vapor de agua	X
3.2.1.2 Definiciones y unidades	X
Presión de vapor	X
Déficit de presión de vapor	X
Humedad absoluta	X
Humedad relativa	X
Temperatura de punto de rocío	X
3.2.2 Papel de la humedad en el crecimiento y desarrollo de plantas	X
3.2.2.1 Crecimiento de la plántula	X
3.2.2.2 Propagación vegetativa	X
3.2.2.3 Manejo de patógenos	X
3.2.3 Niveles óptimos de humedad	X
3.2.3.1 Plántulas	X
Fase de establecimiento	X
Fase de crecimiento rápido	X
Fase de endurecimiento	X
3.2.3.2 Propagación vegetativa	X
3.2.4 Modificando la humedad en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.2.4.1 Estructuras de cultivo	X
3.2.4.2 Humedecimiento	X
Calor de vapor	X
Niebla y asperjado	X
Riego	X
Enfriamiento evaporativo	X
3.2.4.3 Reducción de la humedad	X
Ventilación y calentamiento	X
Reduciendo la humedad de las copas de las plántulas	X
3.2.5 Sistemas de monitoreo y control de la humedad	X
3.2.5.1 Humedad	X
3.2.5.2 Niebla y asperjado	X
3.2.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.2.7 Literatura Citada	X

3.2.1 Introducción

El mantener la apropiada humedad atmosférica en los viveros forestales que producen en contenedor, es importante desde un punto de vista biológico por varias razones: la baja humedad somete a tensión hídrica a las plántulas, causada por la excesiva transpiración, la adecuada humedad promueve un rápido crecimiento, y el exceso de humedad facilita el crecimiento de hongos fitopatógenos y otras enfermedades en el vivero, como son los musgos y hepáticas. El reto de los administradores de viveros es el mantener humedades tales que sean lo suficientemente elevadas para el buen crecimiento de las plántulas, pero sin promover enfermedades (Fig. 3.2.1).

En este capítulo se introducen los conceptos básicos de la humedad, se discuten las formas en que esta afecta el crecimiento de la plántulas, y se presentan los niveles óptimos para viveros forestales que producen en contenedor. Los métodos de cultivo para modificar la humedad, y el equipo de monitoreo de niveles de humedad, también son incluidos.

3.2.1.1 Biofísica del vapor de agua

En el ambiente de los viveros que producen en contenedor, el agua existe en dos de sus tres estados físicos: el vapor de agua invisible (gas) y el estado líquido. El vapor de agua está sujeto a las mismas leyes físicas que otros gases que componen el aire, como el nitrógeno y el oxígeno. El húmedo puede ser definido como una mezcla de dos componentes de aire seco y vapor de agua. El aire y el vapor de agua ocupan simultáneamente el mismo espacio, pero el vapor de agua actúa independientemente de los otros gases. Por tanto, la presión parcial del vapor de agua es solamente una función de la temperatura, y no está relacionada con la presión atmosférica total (Gaffney, 1978). El aire siempre contiene alguna porción de vapor de agua, pero a cualquier temperatura dada, éste retiene sólo una cantidad finita. Cuando se alcanza tal límite físico, el aire está **saturado**, y cuando es excedido ocurre la condensación.



A



B

Figura 3.2.1 Aunque el vapor de agua es un gas invisible, éste puede ser manejado para minimizar la transpiración, como en esta cámara enraizadora (A) o si éste es mal manejado y se facilita su condensación en el follaje de las plántulas (B), puede promover enfermedades.

El agua tiene varias propiedades físicas únicas que afectan el ambiente del vivero que produce en contenedor, incluyendo el más alto calor latente de evaporación conocido. Se requiere de una cantidad extremadamente grande de energía térmica (540 cal/g) para obtener agua líquida a través de la fase de cambio de estado líquido a gaseoso. Esta cantidad es considerablemente mayor a la energía requerida (316 cal/g) para llevar 1 g de hielo del cero absoluto, -273°C (-460°F), al punto de ebullición (Hewitt, 1974). La misma cantidad de energía térmica que es usada cuando el agua se evapora, es liberada cuando el vapor de agua se condensa: la **evaporación** es un proceso endotérmico, mientras que la **condensación** es un proceso exotérmico. Este elevado calor latente de la evaporación resulta significativo operativamente, pues no sólo afecta el calentamiento y el enfriamiento del

ambiente del vivero que produce en contenedor, también enfría las plantas a través de la transpiración.

3.2.1.2 Definiciones y unidades.

Presión de vapor. El vapor de agua en un volumen dado de aire ejerce una presión parcial (e) que depende de la cantidad de vapor y de su temperatura. Es útil pensar en la humedad en términos de una presión o fuerza que es capaz de causar el movimiento del vapor de agua de y hacia objetos en contacto con el aire (Gaffney, 1978). La presión de vapor de agua en el aire de alrededor, denominada **presión de vapor del ambiente** (e_a), varía de cerca de cero en el aire frío y seco, a aproximadamente más de 8 kPa (0.08 atmósferas) en el aire cálido y húmedo (Cuadro 3.2.1). Si la presión de vapor del ambiente es menor que la **presión de vapor en equilibrio** del agua líquida, la evaporación acontece. Cuando la atmósfera comienza a saturarse con vapor de agua, la **presión de vapor de saturación** (e_s) se hace idéntica a la presión de vapor del agua y la evaporación neta cesa.

Tanto mayor sea la temperatura, mayor será la presión de vapor en equilibrio y, en el intervalo común de las temperaturas en un vivero, la presión de vapor de saturación se duplicará aproximadamente por cada aumento en 10°C (20°F) en la temperatura (Cuadro 3.2.1).

Déficit de presión de vapor. Otro concepto importante relacionado con la humedad, es el déficit de presión de vapor (DPV), el cual es igual a la diferencia entre la presión de vapor de saturación, y la presión de vapor en el ambiente, a la misma temperatura:

$$DPV = e_s - e_a$$

El DPV es importante en horticultura porque representa la demanda evapotranspirativa de la atmósfera del ambiente, así como la proximidad del punto de rocío (cuando $e_a = e_s$). Por tanto los viveristas pueden emplear el DPV para determinar que se va a regar, en caso de que la transpiración de la plántula se vaya a

incrementar, o si se proveerá ventilación para evitar la condensación.

La presión de vapor y el déficit de presión de vapor son expresados en unidades de presión estándares (Cuadro 3.2.2). Las unidades métricas son los pascuales (Pa), kilopascuales (kPa), y los megapascuales (MPa), mientras que las unidades inglesas son las atmósferas (atm). Unidades viejas incluyen bars (b), pulgadas o milímetros de mercurio (in. Hg o mm Hg), y libras por pulgada cuadrada (lb/in²).

Humedad absoluta. La cantidad de vapor de agua en un volumen dado de aire es la humedad absoluta; esta está expresada en peso por volumen. Existe una relación directa entre el punto de rocío, la presión de vapor a saturación y la humedad absoluta, ya que cada una depende solamente de la cantidad de agua en el aire a una presión atmosférica determinada (Cuadro 3.2.1). No obstante, la humedad absoluta, raramente es medida en los viveros forestales que producen en contenedor, y la humedad relativa es empleada en su lugar.

Cuadro 3.2.1 Relaciones entre la temperatura de punto de rocío, presión de vapor de saturación, y humedad absoluta.

Punto de rocío		Presión de vapor de saturación	Humedad absoluta
°C	°F	(kPa)	(mg/l)
-40	-40	0.01	0.2
-35	-31	0.02	0.3
-30	-22	0.04	0.5
-25	-13	0.06	0.7
-20	-4	0.10	1.1
-15	5	0.16	1.6
-10	14	0.26	2.4
-5	23	0.40	3.5
0	32	0.60	4.8
5	41	0.86	6.8
10	50	1.21	9.4
15	59	1.68	12.6
20	68	2.31	17.3
25	77	3.13	23.1
30	86	4.19	30.4
35	95	5.42	39.8
40	104	7.28	51.8

Fuente: Schroeder y Buck (1970)

Humedad relativa. El descriptor más común de la humedad, la humedad relativa (HR), es también la medida más práctica en un vivero forestal. La HR puede ser definida como la cantidad de humedad en un volumen de aire, con respecto a la cantidad total de humedad que puede ser retenido a saturación, a una temperatura y presión dadas, y expresada como por ciento. Para calcular la HR, la presión de vapor de agua ambiente se divide entre la presión de vapor a saturación:

$$HR (\%) = \frac{e_a}{e_s} \times 100$$

Dado que tanto la HR como el DPV están relacionados con la temperatura, estos índices de humedad pueden ser obtenidos de cartas de referencia cuando dos de los tres valores son conocidos (Cuadro 3.2.3).

Los viveristas miden en forma rutinaria la humedad relativa con psicrómetros y con higrotermógrafos, y usan esta información

para controlar la humedad en sus estructuras de cultivo. Un **psicrómetro** contiene dos termómetros idénticos, uno mide la temperatura ambiente (**temperatura de bulbo seco**), y el otro mide la temperatura reducida por el enfriamiento evaporativo (**temperatura del bulbo húmedo**). La diferencia entre las dos temperaturas es la **depresión de bulbo húmedo**. Las temperaturas de bulbo húmedo y seco son utilizadas para calcular la humedad relativa y el punto de rocío en cartas psicrométricas (Fig. 3.2.2), o cuadros (Cuadro 3.2.4). La depresión de bulbo húmedo es una medida que puede ser usada con varios propósitos en la operación de invernaderos, como el mostrar la eficiencia teórica de almohadillas (paredes húmedas) para enfriamiento evaporativo (Hanan *et al.*, 1978) (Más información sobre la medición de la humedad puede ser encontrada en la sección 3.2.5).

Cuadro 3.2.2 Unidades utilizadas para medir la presión de vapor y la humedad, y sus conversiones a los sistemas métrico e inglés.

Unidades	
Unidades métricas	Unidades inglesas
Pascales (Pa)	Atmosferas (atm)
Kilopascales (kPa)	Libras por pulgada cuadrada (psi)
Megapascales (MPa)	Pulgadas de mercurio (in Hg)
Bares (b)	
Milímetros de mercurio (mm Hg)	
Factores de conversión	
Métrico a Métrico	Inglés a Inglés
1 kPa = 10 ³ Pa	1 atm = 14.6960 psi
1 MPa = 10 ⁶ Pa	1 atm = 29.921 in Hg
1 Mpa = 10 b	
1 Mpa = 7500.62 mm Hg	
Métrico a Inglés	Inglés a Métrico
1 MPa = 9.8962 atm	1 atm = 0.1013 MPa
1 MPa = 145.04 psi	1 atm = 1.0133 b
1 MPa = 295.30 in Hg	1 atm = 760.0 mm Hg

Fuente: ASHRAE (1989)

Cuadro 3.2.3 La demanda evapotranspirativa, medida por el déficit de presión de vapor, es una función de la humedad relativa y de la temperatura.

Temperatura del aire		Déficit de presión de vapor de agua (kPa)										
		0% RH	10% RH	20% RH	30% RH	40% RH	50% RH	60% RH	70% RH	80% RH	90% RH	100% RH
°C	°F											
0	32	0.61	0.55	0.49	0.43	0.37	0.31	0.24	0.18	0.12	0.06	0
5	41	0.87	0.78	0.70	0.61	0.52	0.44	0.35	0.26	0.17	0.09	0
10	50	1.23	1.11	0.98	0.86	0.74	0.62	0.49	0.37	0.25	0.12	0
15	59	1.71	1.54	1.37	1.20	1.03	0.86	0.68	0.51	0.34	0.17	0
20	68	2.33	2.10	1.86	1.63	1.40	1.17	0.93	0.70	0.47	0.23	0
25	77	3.17	2.85	2.54	2.22	1.90	1.59	1.27	0.95	0.63	0.32	0
30	86	4.24	3.82	3.39	2.97	2.54	2.12	1.70	1.27	0.85	0.42	0
35	95	5.63	5.07	4.50	3.94	3.38	2.82	2.25	1.69	1.13	0.56	0
40	104	7.37	6.63	5.90	5.16	4.42	3.69	2.95	2.21	1.47	0.74	0

El déficit de presión de vapor debería ser mantenido bajo la línea de 1.0 kPa para mantener la tensión hídrica dentro de límites aceptables.

Temperatura de punto de rocío. La saturación ocurre cuando el aire es enfriado hasta el punto en que la presión de saturación de vapor excede la presión de vapor ambiental. La temperatura a la que ocurre esto es llamada **punto de rocío**. El significado práctico del punto de rocío es que éste está directamente relacionado con la cantidad de vapor de agua en un volumen de aire húmedo (Gaffney, 1978). La temperatura de punto de rocío tiene aplicación directa en el manejo de viveros que producen en contenedor debido a su relación con la condensación, la cual acontece cuando el aire húmedo entra en contacto con una superficie más fría, como es la cubierta interior de un invernadero, o una hoja. Los viveristas manejan la humedad en sus viveros para minimizar la condensación, la cual puede originar problemas con enfermedades.

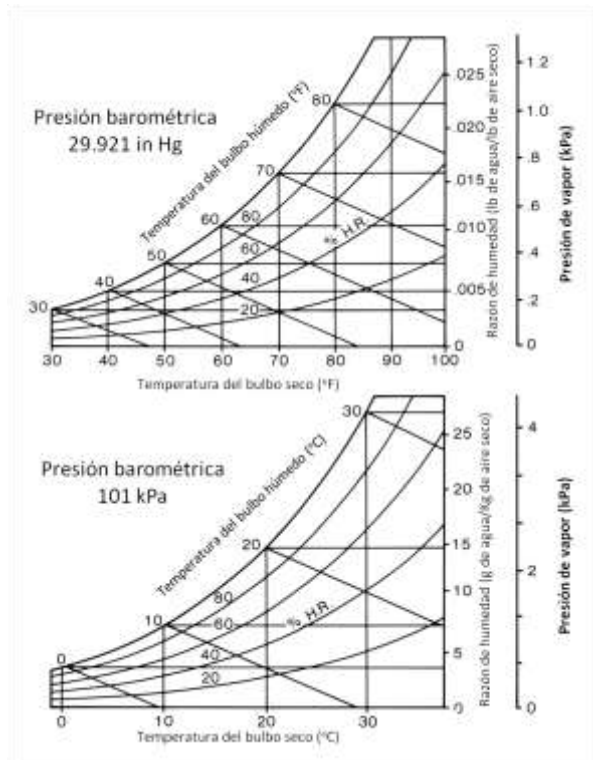


Figura 3.2.2 Una carta psicrométrica, es una representación gráfica de muchas relaciones funcionales que existen entre las varias propiedades físicas y térmicas del aire húmedo. Cuando las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco son medidas con un psicrómetro, estas cartas pueden ser utilizadas para estimar la humedad relativa (Modificadas de Gaffney, 1978).

Cuadro 3.2.4A La humedad relativa (%) puede ser calculada a partir de cartas psicrométricas, utilizando las temperaturas del bulbo húmedo y de bulbo seco de un psicrómetro.

Temperatura del bulbo seco		Temperatura del bulbo húmedo																													
		°C	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	31	32			
°C	°F	°F	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90			
17	62	2	10	17	25	33	42	50	60	69	79	89	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
18	64	--	5	12	20	27	35	43	52	61	70	80	90	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
19	66	--	2	8	15	22	30	37	45	53	62	71	80	90	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
20	68	--	--	5	11	18	24	32	39	47	55	63	72	81	90	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
21	70	--	--	1	7	14	20	27	34	41	48	56	64	72	81	90	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
22	72	--	--	--	4	10	16	22	28	35	42	50	57	65	73	82	91	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
23	74	--	--	--	1	7	12	18	24	30	37	44	51	58	66	74	82	91	100	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
24	76	--	--	--	--	4	9	15	20	26	32	39	45	52	59	67	75	83	91	100	--	--	--	--	--	--	--	--			
26	78	--	--	--	--	--	1	6	11	17	22	28	34	40	46	53	60	67	75	83	91	100	--	--	--	--	--	--			
27	80	--	--	--	--	--	--	4	9	14	19	24	30	35	41	48	54	61	68	76	83	92	100	--	--	--	--	--			
28	82	--	--	--	--	--	--	--	2	6	10	16	21	26	31	37	43	49	55	62	69	76	84	92	100	--	--	--			
29	84	--	--	--	--	--	--	--	--	4	8	13	17	22	27	33	38	44	50	56	63	70	77	84	92	100	--	--			
30	86	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2	6	10	15	19	24	29	34	40	45	51	57	64	70	77	84	92	100	--		
31	88	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	4	8	12	16	21	26	30	35	41	46	52	58	64	71	78	85	92	100	--	
32	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	2	6	10	14	18	22	27	32	37	42	47	53	59	65	71	78	85	92	100

Temperatura del bulbo seco		Temperatura del bulbo húmedo																													
		°C	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	31	32			
°F	°F	°F	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90			
17	62	-31	-16	-8	-3	0	3	6	9	11	12	15	17	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
18	64	--	-21	-12	-6	-1	2	5	8	10	12	14	16	18	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
19	66	--	-2	11	22	30	36	41	46	50	54	58	63	64	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
20	68	--	-33	-16	-9	-3	1	3	7	9	11	13	16	17	19	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
21	70	--	-26	4	17	26	33	39	44	49	53	56	60	63	66	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
22	72	--	--	-21	-11	-5	0	3	6	9	11	13	16	17	19	20	22	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
23	74	--	--	--	-6	12	23	31	38	41	48	52	56	60	63	66	69	72	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
24	76	--	--	--	-33	-15	-8	-2	1	5	8	10	12	14	17	19	20	22	23	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
26	78	--	--	--	-27	5	19	28	35	41	46	51	55	58	62	65	68	71	74	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
27	80	--	--	--	--	-20	-10	-4	0	3	7	10	12	14	16	18	20	21	22	24	--	--	--	--	--	--	--	--			
28	82	--	--	--	--	-5	14	24	32	39	44	49	53	57	61	64	67	70	73	76	--	--	--	--	--	--	--	--			
29	84	--	--	--	--	-30	-14	-7	-2	2	6	9	11	13	16	18	19	21	22	23	26	--	--	--	--	--	--	--			
30	86	--	--	--	--	-23	7	20	29	36	42	47	52	56	60	63	66	69	72	73	78	--	--	--	--	--	--	--			
31	88	--	--	--	--	-19	-9	-3	1	4	7	10	12	14	17	19	21	22	23	25	27	--	--	--	--	--	--	--			
32	90	--	--	--	--	-2	15	26	34	40	45	50	54	58	62	65	69	72	75	77	80	--	--	--	--	--	--	--			
17	62	--	--	--	--	-28	-12	-6	0	3	7	10	12	14	16	18	20	22	23	25	26	28	--	--	--	--	--	--			
18	64	--	--	--	--	-18	9	22	31	38	44	49	53	57	61	64	68	71	74	77	79	82	--	--	--	--	--	--			
19	66	--	--	--	--	-17	-9	-2	2	5	8	11	13	16	17	19	21	22	24	26	27	29	--	--	--	--	--	--			
20	68	--	--	--	--	--	1	17	27	35	41	47	52	56	60	63	67	70	73	76	79	81	84	--	--	--	--	--			
21	70	--	--	--	--	--	--	-24	-12	-4	0	3	8	10	12	15	17	19	20	22	23	26	27	28	30	--	--	--			
22	72	--	--	--	--	--	--	-12	11	24	32	39	45	50	54	59	62	66	69	72	75	78	81	83	86	--	--	--			
23	74	--	--	--	--	--	--	-16	-8	-2	2	6	9	11	13	16	19	20	21	23	25	27	28	29	31	--	--	--			
24	76	--	--	--	--	--	--	4	19	29	37	43	48	53	57	61	63	68	71	74	77	80	83	85	88	--	--	--			
26	78	--	--	--	--	--	--	--	--	-7	14	26	34	41	47	52	56	60	64	67	71	74	77	79	82	85	87	90			

3.2.2 Papel de la Humedad en el Crecimiento y Desarrollo de las Plantas

La humedad atmosférica puede afectar directamente a las plántulas que crecen en contenedores a través de sus efectos en las relaciones hídricas. El control de la humedad es aún más crítico cuando las plántulas han sido propagadas de forma vegetativa, por estacas o por injertos. Existe además un efecto indirecto de la humedad: muchas enfermedades prosperan en el ambiente de un vivero con elevada humedad, como comúnmente existe en los invernaderos.

3.2.2.1 Crecimiento de la plántula

La humedad afecta principalmente las tasas de evapotranspiración. Bajo tales condiciones, la tasa de evaporación de una superficie húmeda es función de la humedad relativa y de la temperatura, y es proporcional al déficit de presión de vapor. A una temperatura constante, tanto mayor sea la humedad relativa, menor será el déficit de presión de vapor (Cuadro 3.2.3). Bajo condiciones operativas, el aumento de la temperatura es más importante que la humedad para la determinación de la demanda evapotranspirativa. Por ejemplo, cuando la HR del aire disminuye 30% (de 80 a 50%) y la temperatura se mantiene a 30°C (86°F), el DPV incrementa 2.5 veces; sin embargo, si la humedad absoluta se mantiene constante la temperatura foliar incrementa justo 10°C, de 10 a 20°C (50 a 68°F), entonces el DPV aumenta unas 5 veces (Kramer, 1983).

Bajo condiciones de calma, el vapor de agua se acumula cerca de una superficie evaporativa, formando una capa de frontera. Si la humedad de la capa de frontera se aproxima a la saturación, la tasa de evaporación casi cesará, aún cuando el aire de alrededor esté mucho más seco. El viento remueve la capa de frontera y la reemplaza con aire seco, aumentando entonces la tasa de evaporación (Schroeder y Buck, 1970). Por ejemplo, si el aire en la capa de frontera estaba a 20°C (68°F) con 90% de HR, y éste fue reemplazado por aire a la misma temperatura y con una HR de 60%, el DPV podrá incrementar unas cuatro veces, de 0.23 a 0.93 kPa (Cuadro 3.2.3).

Las plántulas de especies forestales desarrollan capas de frontera (Fig. 3.2.3), que pueden reducir significativamente la tasa de evapotranspiración en las copas de las densas plántulas en los agregados de contenedores típicos de un vivero forestal. Las capas de frontera son particularmente significativas en el ambiente amortiguado de una estructura de cultivo cerrada, donde el movimiento del aire está restringido.

Las plantas absorben agua a través de sus raíces, del medio de cultivo, y la pierden a través de sus hojas hacia el aire, mediante un proceso conocido como transpiración, la cual es en esencia evaporación bioregulada. Aunque las pérdidas excesivas por transpiración pueden implicar tensión hídrica, una pequeña cantidad de la transpiración es necesaria para mover los nutrimentos minerales de la savia del xilema, desde las raíces hacia las hojas (Kramer y Kozlowski, 1979). Comúnmente se presenta alguna transpiración mientras el agua esté disponible para las raíces. Con luz intensa, las hojas absorberán la suficiente energía radiante para originar un gradiente transpiracional, de la hoja al aire, aún bajo elevada humedad.

Mucha de la pérdida de agua por transpiración, ocurre a través de los estomas en las hojas, los cuales deben mantenerse lo bastante abiertos para absorber suficiente dióxido de carbono (CO₂) para la fotosíntesis (Fig. 3.1.2). Aunque los estomas ocupan sólo aproximadamente 1% de la superficie foliar, las tasas de transpiración pueden alcanzar el 50% de la tasa de evaporación de una superficie de agua libre (Kramer y Kozlowski 1979). Los estomas se mantienen abiertos mientras su presión de turgencia se mantenga elevada, y mientras se mantengan adecuados los niveles de luz. No obstante, si la tasa de pérdida de agua excede la tasa de absorción, se presenta una tensión hídrica interna. Si tal tensión se hace severa, son afectados adversamente procesos metabólicos como la fotosíntesis. Cuando la tensión hídrica alcanza un nivel crítico, los estomas se comienzan a

cerrar y se reduce la fotosíntesis neta. Con un aún mayor aumento en la tensión hídrica, los estomas se cierran más y eventualmente la fotosíntesis cesa. Esta serie de eventos puede ocurrir regularmente en muchas especies durante los días soleados, aunque las plantas estén bien provistas de agua, porque las raíces no pueden absorberla tan velozmente como las hojas la pierden. Para un máximo crecimiento, los estomas deben mantenerse abiertos tanto como sea posible, así los viveristas pueden promover el crecimiento manteniendo humedades relativamente elevadas en el área de cultivo (Fig. 3.2.4) (Una discusión más detallada de las relaciones hídricas en plántulas, puede hallarse en el volumen cuatro de esta serie).

Una tasa de transpiración moderada es también benéfica, pues enfría la hoja y la mantiene cerca de la temperatura óptima para la fotosíntesis y otros procesos metabólicos (Clawson *et al.*, 1989). Otros procesos del crecimiento de la plántula como la elongación celular, también dependen de una presión de turgencia positiva.

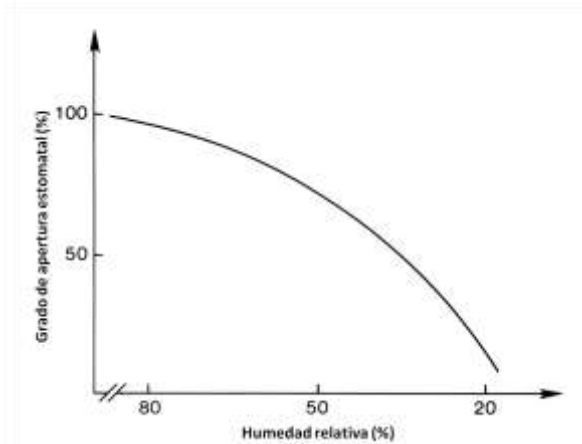


Figura 3.2.4 La tasa de transpiración está relacionada directamente con el tamaño de la apertura estomatal, la cual es regulada por células guarda que responden a la humedad atmosférica y a otros estímulos ambientales (modificada de Jarvis, 1980).

3.2.2.2 Propagación vegetativa

Aunque muchas especies forestales son producidas por semilla, en bastantes viveros se practica también alguna forma de propagación vegetativa. Las existencias de árboles mejorados, en particular, son con frecuencia propagadas vegetativamente para que puedan ser mantenidos los genotipos deseados. Las existencias de huertos semilleros son propagadas por estacas o por injerto, y las existencias de pruebas genéticas pueden ser frecuentemente producidas más fáciles y económicamente con estacas. Muchas especies que son usadas en dasonomía con propósitos de conservación, como los álamos y los sauces, son propagadas vegetativamente.

La manutención de una adecuada humedad es de particular importancia en la propagación vegetativa. La tasa de transpiración de las estacas debe mantenerse baja durante varias semanas, incluso meses, a efecto de que puedan mantener la suficiente turgencia para producir nuevas raíces. Las injertadas, frecuentemente son mantenidas bajo condiciones de invernadero, pues los altos niveles de humedad reducen la tensión hídrica en las púas injertadas (Hartmann y Kester, 1983). Con el propósito de mantenerlas con altos niveles de humedad, se construyen ambientes especiales para el enraizamiento (fig. 3.2.5).

3.2.2.3 Manejo de patógenos

Los altos niveles de humedad pueden ser deseables en los viveros que producen en contenedor, pero no siempre es el caso. Las enfermedades como hongos fitopatógenos, musgos y hepáticas, son estimuladas por tal ambiente, especialmente si está presente el agua libre. Las criptógamas (musgos, algas y hepáticas), prosperan en el ambiente del vivero que produce en contenedores, y pueden incluso cubrir completamente la parte superior del contenedor e interferir con el crecimiento de la plántula. En casos o extremos, estas enfermedades pueden formar una masa gruesa que evita por completo la infiltración de agua y fertilizantes líquidos (Fig. 3.2.6A).

Algunas plagas, inclusive, pueden estar relacionadas con ambientes ricos en humedad. Los jenes *Bradysia* spp. pueden alcanzar niveles poblacionales dañinos en los invernaderos que tengan cantidades excesivas de musgos y algas.

Aunque muchos hongos prosperan bajo elevada humedad, ciertos fitopatógenos son particularmente favorecidos por tal condición; el hongo *Botrytis cinerea* es un ejemplo notable. Sus esporas requieren de humedad libre para germinar y penetrar el follaje de la plántula (Fig. 3.2.6B), y las elevadas humedades conducen la subsecuente dispersión del hongo. En efecto, sólo 3 horas a temperaturas de 15 a 20°C (59 a 68°F) y 98% de HR promueven la infección si hay humedad libre presente. Peterson *et al.* (1988), consideran valores de HR superiores al 90% como ideales para la germinación de esporas de *B. cinerea*, y encontraron que la HR dentro de la copa de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) típicamente supera este umbral por la noche. Este hongo es más de cuidado en el otoño, cuando las frías temperaturas originan la condensación de la humedad en el follaje de las plántulas, especialmente cuando la densidad de plántulas y sus copas es elevada.



A



B

Figura 3.2.5 Algunas especies que son cultivadas con propósitos de conservación, son más fácilmente propagadas a través de estacas en cámaras de enraizamiento especialmente equipadas, las cuales mantienen un alto nivel de humedad para retardar la transpiración (A y B).



A



B

Figura 3.2.6 Los períodos prolongados de elevada humedad pueden causar problemas de plagas, como un crecimiento excesivo de algas, musgos o hepáticas, los cuales pueden cubrir la apertura del contenedor (A). Las esporas de hongos fitopatógenos, como *Botrytis cinerea*, requieren de humedad libre antes de que puedan germinar y causar una infección (B, cortesía de F. Dugan).

El porcentaje del tiempo en que la HR excedió el 90% en un invernadero de fibra de vidrio, aumentó de 59% en agosto a 85% en octubre (Las plagas de viveros son discutidas a detalle en el volumen cinco de esta serie).

3.2.3 Niveles Óptimos de Humedad

Es extremadamente difícil establecer niveles ideales de humedad para los viveros forestales que producen en contenedor, porque la humedad relativa varía mucho con la temperatura. Los niveles óptimos de humedad cambiarán durante la estación de cultivo para las plántulas, y diferirán entre plántulas y estacas.

3.2.3.1 Plántulas

Se tienen pocos experimentos referentes a la determinación de los niveles de humedad óptimos para el cultivo de plantas. En una cámara de ambiente controlado experimental, con temperaturas de 18 a 24°C (65 a 75°F), Krizek *et al.* (1971) encontraron que una HR de 40% reduce severamente el crecimiento de plántulas de tres especies de flores de jardín (Agerato, Petunia y Maravilla). Elevar la HR a 65% resultó en un fuerte incremento en los pesos fresco y anhidro, área foliar y altura; aumentando la HR hasta 90% no se produjeron ya beneficios. Respuestas similares han sido reportadas para *Pinus taeda* L. (Seiler y Johnson, 1984) y plantas de pepino (van de Sanden, 1985). Aparte de estos pocos ejemplos, la investigación en relación a los efectos de la humedad en el crecimiento de las plántulas no es extensa.

Mucho de nuestro conocimiento actual ha sido obtenido a través de la experiencia y observación en la operación de viveros que producen en contenedores. En respuesta a una investigación reciente, los viveristas reportaron que sus niveles ideales de HR se redujeron durante la estación de crecimiento, con intervalos de 60 a 80% en la fase de establecimiento, a 45 a 50% durante la fase de endurecimiento (Cuadro 3.2.5). En varios viveros está establecido que en realidad no pueden tener niveles óptimos de humedad porque son difíciles de controlar, especialmente en estructuras de cultivo que no están del todo cerradas, como las áreas de sombreado. Sin embargo, muchos estuvieron de acuerdo en que las elevadas humedades definitivamente son importantes durante las

etapas de germinación de la semilla y de emergencia.

Fase de establecimiento. El manejo de la humedad es más crítico durante el período de germinación. Las semillas son sembradas en la parte superior del medio de cultivo, bajo una delgada cubierta que debe mantenerse húmeda para que la semilla nunca se seque. En muchos viveros se usan boquillas nebulizadoras especiales durante este período, con el propósito de conservar "húmedo pero no en exceso" el medio de cultivo (Fig. 3.2.7). La conservación de elevadas humedades relativas de 60 a 90% (Cuadro 3.2.6), elimina la necesidad de riego frecuente, pero puede mantener el medio de cultivo tan húmedo, que se promueva la presencia de "damping-off".

Debido a que la humedad relativa varía tanto con la temperatura, es más eficiente el manejar el déficit de presión de vapor. Los valores de DPV correspondientes a las HR que se elijan como ideales (Cuadro 3.2.6) deberían ser considerados solamente como guías aproximadas, considerando la dificultad de tener un ajuste preciso de humedad. El DPV puede ser fácilmente calculado con el uso de mediciones de la HR y de la temperatura de un psicrómetro o de un higrotermógrafo (ver la sección 3.2.5 para más información).

Fase de crecimiento rápido. Tan pronto como las plántulas hayan establecido sus sistemas radicales, la humedad relativa debe ser reducida hasta 50 a 80% (Cuadro 3.2.6). Esto conservará baja la evapotranspiración, pero la superficie del medio de cultivo y el follaje de las plántulas se mantendrán secos. Un DPV de aproximadamente 1.00 kPa es un nivel óptimo razonable para esta fase; la línea coloreada en el Cuadro 3.2.3 delimita las combinaciones de temperatura y de HR que mantendrán la demanda evapotranspirativa bajo tal ideal.



Figura 3.2.7 Un adecuado manejo del agua es crítico durante la fase de establecimiento. Las boquillas nebulizadoras proporcionan períodos cortos con gotas de agua que conserven húmeda a la semilla en germinación, y promueven una emergencia rápida y completa. La elevada humedad resultante también retarda la transpiración hasta que el sistema radical de las jóvenes plántulas consiga establecerse.

Cuadro 3.2.5 Niveles óptimos e intervalos de humedad relativa, para plántulas en sus tres fases de crecimiento en viveros forestales que producen en contenedores.

Cultivo	Estado (EUA)	Estructura de cultivo	Humedad relativa					
			Establecimiento		Crecimiento		Endurecimiento	
			NI	I	NI	I	NI	I
<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Abies</i> , <i>Larix</i> , <i>Pinus</i>	ID	Totalmente cerrada	75	50-100	70	50-100	50	30-100
<i>Betula</i> , <i>Abies</i> , <i>Juniperus</i> , <i>Larix</i> , <i>Acer</i> , <i>Quercus</i> , <i>Pinus</i> , <i>Picea</i> , <i>Thuja</i> , <i>Juglans</i> .	MN	Totalmente cerrada	80	80-90	60	50-70	Ambiente	
<i>Cupressus</i> , <i>Juniperus</i> , <i>Pinus</i>	TX	Totalmente cerrada	60	40-80	60	40-80	Ambiente	
<i>Picea</i>	ME	Totalmente cerrada	Na	60-80	Na	50-70	Na	50-70
<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Eucalyptus</i> , <i>Pinus</i> , <i>Sequoia sempervirens</i>	CA	Semi-cerrada	70	50-100	55	30-90	45	30-70
<i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Abies</i> , <i>Larix</i> , <i>Pinus</i> , <i>Picea</i>	MT	Semi-cerrada	Na	40-90	Na	20-95	Na	50-95

NI: Nivel óptimo; I: Intervalo; ID: Idaho; MN: Minnesota; TX: Texas; ME: Maine; CA: California; MT: Montana; Na: Ninguna. Fuente: Investigación sobre viveros que producen en contenedores.

Cuadro 3.2.6 Niveles óptimos de humedad relativa y de déficit de presión de vapor (DPV) para viveros forestales que producen en contenedores.

Fase de crecimiento	Humedad relativa (%)		DPV correspondiente a 25°C (kPa)	
	Objetivo	Intervalo	Objetivo	Intervalo
Establecimiento	80	60-90	0.60	1.3 - 0.3
Crecimiento rápido	60	50-80	1.20	1.6 – 0.6
Endurecimiento	Ambiente		Ambiente	

Cuando las temperaturas en el área de cultivo se hacen excesivas, en muchos viveros con frecuencia, aplican una fina neblina en combinación con sombra, para enfriar las plántulas (Fig. 3.2.8). Algo de la neblina se evapora antes de alcanzar el piso, reduciendo así la temperatura. Sin embargo, estas aplicaciones de neblina deberían ser relativamente breves, o la humedad se acumulará en el follaje de las plántulas y esto puede promover enfermedades. Esta precaución es particularmente importante de considerar inmediatamente después de la rutina de riego. La humedad libre en la superficie mantiene el aire casi saturado, dentro de la copa de la plántula, y promueve enfermedades foliares, como el moho gris (*Botrytis cinerea*). Programando los riegos temprano por la mañana, se da tiempo para que la humedad sobre las plántulas se evapore. Un período crítico para el control de la humedad en un invernadero, es cuando las copas de las plántulas se cierran. Durante este período, debe ser mantenida una adecuada circulación de aire en el invernadero para reducir la humedad alrededor de las plántulas; la circulación del aire es aún eficiente durante los períodos de elevada humedad porque el movimiento del aire crea un gradiente de presión de vapor, del follaje a la atmósfera.



Figura 3.2.8 Los riegos breves, o nebulizaciones, pueden proveer enfriamiento cuando la temperatura es excesiva en el área de cultivo. Sin embargo, las aplicaciones deben ser breves, de lo contrario la elevada humedad puede originar condensación y goteo sobre el cultivo, y acumularse así humedad excesiva en el sustrato (flechas).

Fase de endurecimiento. Los objetivos de cultivo de esta fase son hacer más lento el crecimiento en altura, promoviendo la aparición de yemas, así como el

endurecimiento de las plántulas a tensión ambiental. El reducir la humedad a niveles ambientales durante este período (Cuadro 3.2.6) encauza a las plántulas a tolerar una mediana tensión hídrica. No obstante, esto puede ser difícil de lograr en los invernaderos cerrados, pues las bajas temperaturas propias de fines de verano y del otoño, promueven elevadas humedades y con frecuencia condensación, especialmente por la noche. Por esta razón, en muchos invernaderos las plántulas son removidas del invernadero al comienzo de la fase de endurecimiento, y en otros se remueve la cubierta, a menos que las condiciones exteriores sean de mucha tensión (Cuadro 3.2.5). Las estructuras de protección son particularmente benéficas durante este período porque sus lados pueden ser levantados para promover una buena ventilación cruzada (Fig. 3.1.12B).

3.2.3.2. Propagación vegetativa

En todo tipo de propagación vegetativa, se necesitan humedades más elevadas que para el cultivo de plántulas. Con cualquier tipo de estacas, el aprovisionamiento normal de agua ha sido intensificado, y la tensión hídrica rápidamente puede hacerse severa. El problema es crítico con estacas de madera suave, que poseen hojas que están transpirando, así como con las estacas de madera dura, que enraízan lentamente. Ya que la producción de nuevas raíces requiere de una presión de turgencia positiva, la tensión hídrica en las plantas debe ser minimizada manteniendo la presión de vapor ambiental cerca del mismo nivel que en la planta (Hartmann y Kester, 1983). Es deseable el mantenimiento de los valores de humedad relativa tan cerca del 100% como sea posible (Fig. 3.2.1A); una vez que las estacas han arraigado, gradualmente se endurecen a las condiciones ambientales a través de la reducción gradual de la humedad. Las plantas recientemente injertadas también se benefician en ambientes con elevada humedad, hasta que los injertos prenden y se normalizan las relaciones hídricas internas.

3.2.4 Modificando la Humedad en los Viveros Forestales que producen en Contenedor

Muchos viveros que producen en contenedores no están diseñados con equipo específico para el control de la humedad, pero utilizan el equipo existente para el calentamiento, ventilación, e irrigación para mantener la humedad dentro de intervalos deseables. El tipo de estructura de cultivo tiene algún efecto, dado que algunos invernaderos retienen mejor que otros la humedad.

3.2.4.1. Estructuras de cultivo

Las estructuras totalmente cerradas son mejores para el mantenimiento de un determinado nivel de humedad, pues no permiten el intercambio de aire con el ambiente exterior. Todos los invernaderos carecen de aire en alguna medida, así que tanto más hermética la estructura, menor la variación que se puede esperar en la humedad (Hanan *et al.*, 1978). Es difícil mantener elevada la humedad en un invernadero semi-cerrado (como las estructuras de protección) que tiene lados enrollables, los cuales no pueden ser sellados. Sin embargo, esta característica de diseño definitivamente es una ventaja, cuando el objetivo es deshumerar el ambiente con rapidez.

El tipo de cubierta del invernadero también es relevante. Las cubiertas plásticas (polietileno o "poli"), ajustan mejor y tienen pocas arrugas, en comparación con los paneles rígidos, además de que permiten un menor intercambio de aire. Las estructuras de cultivo bien aisladas, como son aquella con cubiertas dobles de polietileno, y las mantas térmicas, tendrán una mayor humedad (Aldrich y Bartok, 1989). Sin embargo, a causa de su pobre aislamiento, los invernaderos con cubiertas de polietileno de una sola capa, frecuentemente facilitan la condensación sobre sus superficies internas, lo cual puede acarrear problemas de goteo (Mastarlez, 1977). Existen diferencias en la transparencia de la luz solar entre las diferentes cubiertas, que pueden afectar las temperaturas internas y por ende, los niveles de humedad relativa.

Para un período de 4 meses, a fines del verano y otoño en la Columbia Británica (Canadá), la HR en estructuras de cultivo de fibra de vidrio fue significativamente mayor que en las estructuras de cultivo con cubiertas de plástico, y esta variación no solamente se debió a diferencias en la temperatura (Fig. 3.2.9). Tales diferencias fueron culturalmente importantes pues las pérdidas por enfermedades fueron 8 veces superiores en el invernadero de fibra de vidrio que en la estructura cubierta con polietileno (Peterson *et al.*, 1988).

3.2.4.2 Humedecimiento

El humedecimiento es usado operativamente para retardar la evapotranspiración bajo las siguientes condiciones:

1. Durante la fase de establecimiento, cuando las semillas en germinación, estacas e injertos recientes, requieren de condiciones "húmedas pero no en exceso".
2. En los tiempos durante la estación de cultivo, en que el aire exterior es mucho más frío que en el invernadero, porque el aire caliente contiene menos humedad.
3. En climas áridos, donde el aire exterior es con frecuencia cálido y seco.

El humedecimiento es más comúnmente necesario en climas áridos, durante tiempo frío, cuando el aire relativamente seco es llevado dentro del invernadero y calentado, lo cual eventualmente reduce la HR. Mientras la reducción de la humedad depende de los sistemas de calentamiento y ventilación para disipar la humedad atmosférica, el humedecimiento requiere de la conservación de la humedad y de la adición de vapor de agua en la atmósfera del invernadero.

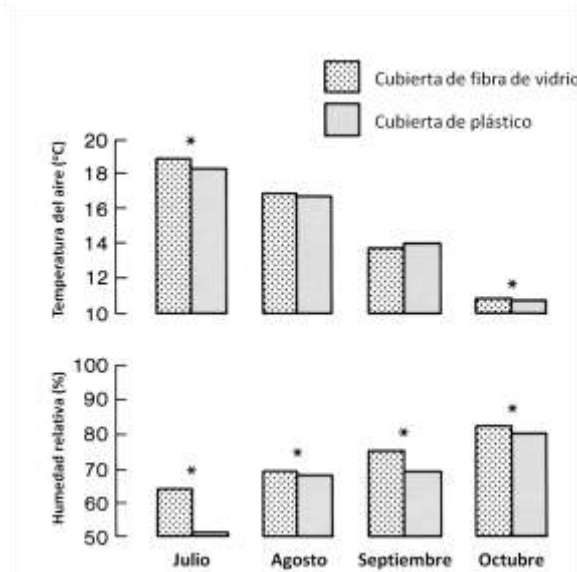


Figura 3.2.9 El tipo de cubierta puede afectar la temperatura y humedad relativa (HR) en el ambiente del invernadero. Los invernaderos de fibra de vidrio tienen humedades significativamente mayores durante fines del verano e inicios del otoño, cuando el "moho gris" (*Botrytis cinerea*) puede resultar un problema. *Significativo con $P=0.05$ (Adaptado de Peterson et. 1988).

La humedad es conservada manteniendo el invernadero cerrado siempre que sea posible. Debido a que la transpiración de la plántula agrega humedad al aire, es mucho más fácil mantener húmedo un invernadero totalmente lleno, en comparación con uno que no lo está. Con tiempo atmosférico frío, el vapor de agua se condensa sobre el lado interno de las cubiertas no aisladas, gotea al piso y se drena, removiendo la humedad de la atmósfera del invernadero. La condensación es reducida en las cubiertas con pared doble, y bien aisladas. En los invernaderos insuficientemente aislados, la manutención de la humedad se dificulta con tiempo atmosférico frío, independientemente del sistema de humedecimiento.

Calor de vapor. La forma más fácil de humedecer un invernadero, es con vapor, pues el agua es ya un vapor. Los invernaderos calentados mediante vapor pueden ser equipados con ventilas en la línea de vapor, las cuales son controladas mediante un mecanismo. **Estas ventilas deben ser ubicadas en un sitio seguro, donde nadie pueda resultar escaldado** y donde el vapor de agua sea rápidamente distribuido a través del invernadero.

Niebla y asperjado. La humedad puede ser agregada mediante el asperjado de pequeñas gotas de agua al aire (Fig. 3.2.10). La diferencia entre niebla y asperjado, está en el tamaño de la gota. Las gotas del asperjado son lo suficientemente grandes para estabilizarse en pocos segundos y humedecer las superficies con las que hacen contacto. Las gotas de la neblina son muy pequeñas, casi invisibles, y pueden mantenerse suspendidas durante varios minutos, durante los cuales muchas se evaporan. Propiamente aplicada, la niebla puede no humedecer el follaje. Con cualquiera, niebla o asperjado, puede ser necesario sombrear el invernadero para mantener la elevada humedad deseada.

Existen dos tipos básicos de boquillas utilizadas para producir niebla y asperjado. La boquilla de impacto dirige un chorro de agua contra una superficie, dispersando el agua en pequeñas gotas. La boquilla centrífuga rota el agua dentro de un orificio, produciéndose el mismo efecto. A causa de la elevada tensión superficial del agua, tanto más pequeña la gota, mayor la energía requerida para producirla. Esta energía puede provenir de varias fuentes. Las boquillas nebulizadoras normalmente operan satisfactoriamente con la presión estándar del agua doméstica de 300 a 450 kPa (45 a 65 lb por pulgada cuadrada). Las boquillas para niebla requieren de una bomba reforzada para alcanzar la presión de 2 700 a 10 000 kPa (400 a 1 500 lb por pulgada cuadrada). Otros sistemas de nebulización emplean motores eléctricos para girar una rueda que tiene orificios sobre su borde. La fuerza centrífuga eleva la presión de agua en el orificio, y con frecuencia es utilizado un ventilador para distribuir la niebla. Un tercer tipo usa aire comprimido para convertir el agua en niebla.



A



B

Figura 3.2.10 Tanto los sistemas para producir asperjado como niebla, pueden ser usados para humedecer el ambiente del invernadero. Las boquillas asperjadoras (A) producen pequeñas gotas de agua que se ubican sobre el follaje de la plántula, mientras que los sistemas de producción de neblina producen partículas de agua lo suficientemente pequeñas para mantenerse suspendidas en el aire (B).

La selección del sistema dependerá del tipo de cultivo, clima, sistema de ventilación en el invernadero, objetivos culturales, y calidad del agua (Weed, 1989). Los sistemas asperjadores son baratos de operar y humedecen el follaje bajo ellos. Esto puede ser benéfico, pues las temperaturas foliares serán reducidas y a través del asperjado, se pueden liberar nutrientes minerales o plaguicidas al cultivo. No obstante, el asperjado excesivo puede lixiviar nutrientes, dejar depósitos minerales, promover el crecimiento de algas, y promover enfermedades fungosas (Hartmann y Kester, 1983). Los sistemas nebulizadores son más caros de instalar y operar, pero han probado ser superiores para el control de la humedad. Son especialmente útiles en la propagación vegetativa, y pueden ser utilizados en el exterior, como protección ante heladas (Gordon, 1989).

Debido a que las boquillas nebulizadoras y asperjadoras tienen orificios pequeños, el agua debe pasar a través de unos filtros con poros muy finos para remover cualquier partícula suspendida que pueda obstruir el orificio (Fig. 3.2.11A). Nebulizar o asperjar con agua salina depositará sales en el follaje (Fig.3.2.11B). Estos depósitos no sólo son desagradables, también pueden causar quemaduras por sales e inhibir la fotosíntesis. Este problema puede ser particularmente serio en los sistemas de propagación vegetativa, por las frecuentes aplicaciones. Los fertilizantes y plaguicidas que contienen partículas suspendidas no deberían ser aplicados a través de sistemas nebulizadores (la calidad del agua de riego y la filtración son discutidas a detalle en el volumen cuatro de esta serie).



A



B

Figura 3.2.11 El agua de riego que será usada para el asperjado o la nebulización, debe ser filtrada o tratada en alguna otra forma para remover los sólidos suspendidos (A), y el agua salina debe ser tratada para prevenir la obstrucción de boquillas o los "depósitos de óxidos" (B).

Riego. Las boquillas estándares de riego también pueden ser empleadas para humedecer un invernadero, si son abiertas por intervalos breves. Sin embargo, el proceso ha de ser monitoreado cuidadosamente, pues la sobre irrigación puede resultar en temperaturas foliares sub-óptimas, follaje húmedo, y saturación del medio de cultivo, condiciones que pueden promover las enfermedades fungosas. Las bombas móviles de riego ubicadas en lo alto, son particularmente efectivas para el humedecimiento, porque proveen cobertura suficiente, y los intervalos de irrigación pueden ser controlados fácilmente (Grazoli, 1988). Algunos viveristas han acondicionado bombas móviles con cabezas múltiples, una de las cuales es una boquilla asperjadora (Fig. 3.1.22B). Sin embargo, la efectividad de enfriamiento con el riego es breve, pues el aumento en HR dura menos de 1 hora (Mastarlez, 1977). No importa qué tipo de sistema de riego se utilice, el agua debería ser filtrada para remover sólidos en suspensión que pueden originar problemas.

Enfriamiento evaporativo. En climas áridos, un sistema de enfriamiento evaporativo (Fig. 3.1.19) puede ser un medio efectivo para el humedecimiento durante el tiempo cálido. Hanan *et al.* (1978) reportan que el enfriamiento evaporativo típicamente aumenta la HR a aproximadamente 70 u 80%, y que el flujo de aire frío y húmedo puede también reducir el DPV. Sin embargo, los sistemas de enfriamiento evaporativo no deberían ser empleados como la principal fuente de humedad, sino más adecuadamente por su efecto benéfico en el control de la temperatura.

3.2.4.3 Reducción de la humedad

Cuando es elevada la humedad atmosférica, es necesario reducirla para prevenir problemas como condensación excesiva. La elevada humedad ocurre con más frecuencia en las siguientes condiciones:

1. Después del riego, especialmente cuando el área de crecimiento no puede ser inmediatamente ventilada.

2. En climas con elevada humedad atmosférica permanente.

Ventilación y calentamiento. La forma más simple y fácil para reducir la humedad del medio de cultivo, es ventilar con aire seco o cálido. Cuando el aire exterior está seco, los viveristas simplemente pueden activar el sistema de ventilación, cualquiera que sea la humedad del invernadero por encima del nivel objetivo (Fig. 3.2.12). Si la ventilación por sí sola no es efectiva, entonces puede ser utilizada una combinación de calentamiento y ventilación, aún cuando el aire exterior sea muy húmedo. Con frecuencia, cuando las condiciones requieren reducción de la humedad, el aire exterior será lo suficientemente frío para que el sistema de calentamiento automáticamente abra las ventanas. También es posible encender los sistemas de ventilación y calentamiento simultáneamente, a efecto de garantizar la reducción de la humedad. Además de reducir la HR ambiental, el flujo de aire cálido sobre el follaje, puede prevenir eficientemente la condensación y eliminar la estratificación de temperaturas en el invernadero (Aldrich y Bartok, 1989). Debe tenerse presente que las elevadas tasas de ventilación con aire muy seco pueden resultar en tensión hídrica para las plántulas (Hanan *et al.*, 1977).

Reduciendo la humedad de las copas de las plántulas. La ventilación por perforaciones o tubos calentados, con frecuencia se colocan bajo bancos elevados, de modo que el aire es forzado a moverse hacia arriba, a través de las plántulas, reduciendo con eficacia la humedad del microambiente dentro de la copa (Fig. 3.1.27B). El aire caliente no sólo seca el follaje, también aumenta la temperatura del cepellón radical, lo cual puede ser benéfico, especialmente durante los meses de invierno (Hallett, 1982). Peterson y Sutherland (1989) hallaron que la ventilación bajo bancos con aire frío toma 11 horas más para secar las plántulas, en comparación con la ventilación con aire calentado, pero concluyen que la ventilación con aire frío fue mejor para reducir el potencial de germinación del hongo "moho gris" (*Botrytis cinerea*).

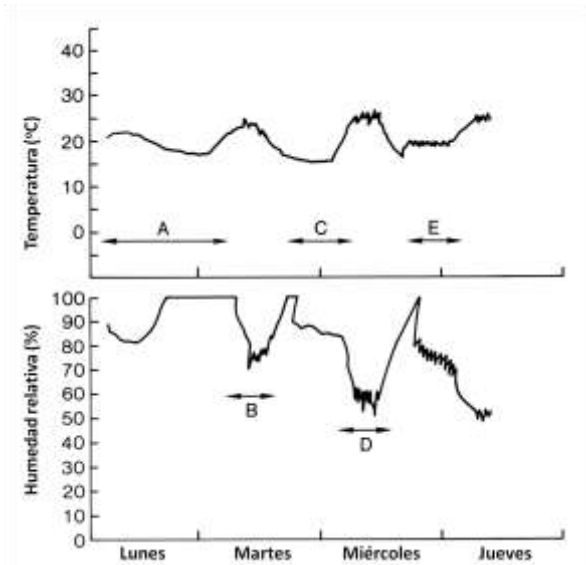


Figura 3.2.12 Esta carta higrotermográfica ilustra cómo la reducción de la humedad puede ser completada. El lunes (A) es nublado y húmedo, y no se hacen intentos para controlar la humedad, la cual alcanza 100% a las 6 P.M. y se mantiene ahí toda la noche. El martes (B) es cálido y parcialmente soleado, y la temperatura ascendente por sí sola reduce la humedad durante el día. En la tarde la humedad nuevamente alcanza 100%, pero a las 8 P.M. comienza la ventilación mediante ventiladores (C). Si el aire exterior es menos húmedo que el del interior del invernadero, la humedad puede ser reducida aún si el aire exterior es más frío. El miércoles (D) es soleado, y la humedad cae considerablemente, pero de nuevo alcanza 100% a las 8 P.M. En este momento (E) viene el ciclo de descondensado (ambos, calentamiento y ventilación) y reduce la humedad drásticamente.

La humedad de la copa de la plántula puede ser reducida con ventiladores, que pueden ser movidos al sitio después del riego, o montados directamente sobre la bomba de riego (Fig. 3.2.13). Un viverista ha usado con éxito un soplador foliar portátil para secar el follaje después del riego.

Los calentadores radiantes en la parte superior (Fig. 3.1.28) reducen la humedad dentro de la copa de la plántula, y eliminan condensación sobre el follaje eficientemente. La radiación térmica calienta objetos más que el aire que les rodea, reduciendo así la HR sin aumentar el flujo de aire alrededor de las plántulas, que pueden incrementar sus tasas de evapotranspiración.



Figura 3.2.13 Inmediatamente después del riego, los ventiladores pueden ser empleados para aumentar el flujo de aire sobre el follaje de las plántulas, y evaporar la indeseable humedad superficial.

3.2.5 Sistemas de Monitoreo y de Control de la Humedad

Es relativamente difícil medir la humedad, en comparación con otras variables atmosféricas. La humedad relativa es la única medición de humedad que es monitoreada rutinariamente en los viveros que producen en contenedores, aunque los nuevos sistemas computarizados pueden calcular el déficit de presión de vapor.

3.2.5.1 Humedad

Cualquier instrumento que mida la humedad es denominado un **Higrómetro**. Un **psicrómetro** es un tipo común de higrómetro que consta de dos sensores de temperatura adyacentes: un sensor de bulbo seco que mide la temperatura ambiental, y un sensor de bulbo húmedo que está cubierto con una tela absorbente. Esta tela es humedecida con agua destilada y ambos sensores son ventilados con aire moviéndose al menos a 3.5 m/s (12 pies por segundo), hasta que la temperatura del bulbo húmedo se estabilice. La diferencia entre las temperaturas del bulbo húmedo y del bulbo seco, es conocida como **depresión del bulbo húmedo**.

Comúnmente se usan dos tipos de psicrómetros en los viveros que producen en contenedores. El **psicrómetro de cadena** (o de honda) (Fig. 3.2.14) es girado manualmente con movimientos circulares hasta que la temperatura del bulbo húmedo se estabiliza. En el psicrómetro de aspirado, los termómetros se mantienen estacionarios, y el aire es empujado a través de los bulbos mediante un pequeño ventilador. Están disponibles cartas y tablas para convertir las temperaturas de bulbos húmedo y seco en humedad relativa, o en punto de rocío (Fig. 3.2.3 y Cuadro 3.2.4). Los psicrómetros tienen una precisión de 0.3 a 3.0% y un intervalo efectivo de -18 a 260°C (0 a 500°F). Debido a que la depresión del bulbo húmedo es tan somera, los psicrómetros son menos precisos a bajas temperaturas, y se requiere de cartas especiales cuando prevalecen temperaturas bajo cero (ASHRAE, 1989). Además, los errores causados por un bulbo húmedo sucio, o una ventilación sub-óptima, siempre resultan en una lectura de depresión de bulbo

húmedo reducida, que a su vez origina una lectura elevada de la HR. No obstante, los psicrómetros se mantienen como una forma útil de medir la HR bajo condiciones de invernadero.

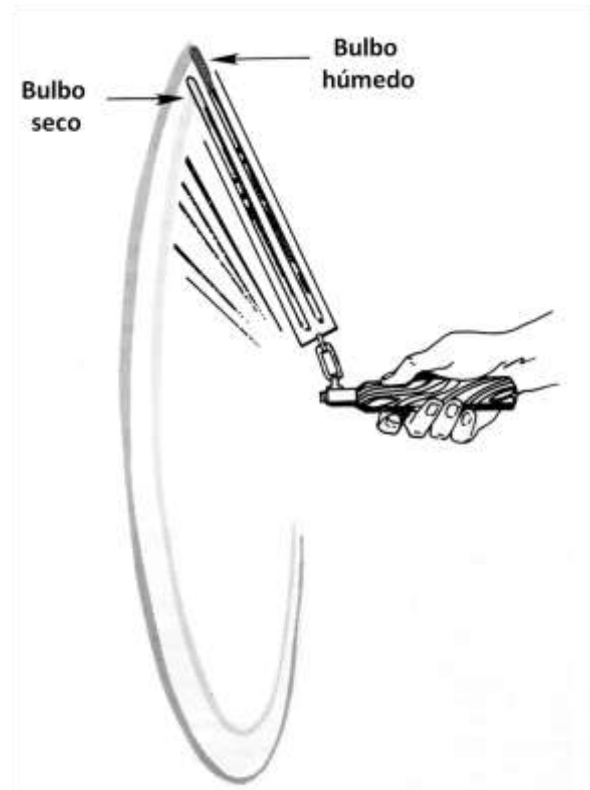


Figura 3.2.14 Un psicrómetro de cadena contiene dos termómetros: el "bulbo seco", que mide las condiciones ambiente, y el "bulbo húmedo", que está cubierto con una tela y que mide la temperatura menor resultante del enfriamiento evaporativo. La diferencia entre estas dos lecturas es la depresión de bulbo húmedo. El psicrómetro es girado con movimientos circulares, hasta que la temperatura de bulbo húmedo se estabiliza. Los dos termómetros son rápidos de leer, y la humedad relativa puede ser determinada a partir de cartas psicrométricas (ver Figura 3.2.2) o cuadros (ver Cuadro 3.2.4) (Adaptado de Schroeder y Buck, 1970).

El otro instrumento que es comúnmente usado para monitorear la humedad en viveros que producen en contenedores, es el higrómetro (Fig. 3.1.31C), el cual mide tanto la temperatura del aire como la humedad relativa (Fig. 3.1.12). A causa de las proteínas presentes en el pelo (keratina), éste cambia su longitud en respuesta a cambios en

la humedad, por lo que los cabellos humanos con frecuencia son utilizados en los higrotermógrafos. Estos aparatos tienen una precisión de 3% de HR, pero su exactitud disminuye a humedades extremas y responden lentamente a los cambios (ASHRAE, 1989). Tienen la ventaja de registrar continuamente los valores de HR para mostrar las tendencias diurnas y diarias. Una buena aproximación se consigue instalando un higrotermógrafo sombreado para proporcionar un registro permanente de la HR, y entonces ocasionalmente verificar el instrumento con un psicrómetro de cadena.

Los sensores de HR eléctricos ofrecen una mayor precisión y son durables y compactos. Se pueden hacer en ellos lecturas digitales, lo que facilita su uso. Los dos sensores de este tipo más empleados son el elemento Dunmore y la celda Pope, ambos usan redes de alambre en un sustrato conteniendo una sal higroscópica. La resistencia eléctrica de los sustratos declina conforme la humedad del aire de alrededor aumenta. Aunque son muy precisos y de rápida respuesta, estos dos tipos de sensores son altamente sensibles a la contaminación, la cual reduce su vida útil cuando se usan en viveros que producen en contenedores (Gaffney, 1978).

Un nuevo sistema de control ambiental puede medir el DPV alrededor del follaje de la planta. Una computadora usa sensores para medir la temperatura foliar y la temperatura y HR del aire. Debido a que el aire dentro de los estomas siempre está cercano a la saturación, bajo condiciones normales de vivero, el DPV de la hoja puede ser determinado a partir de su temperatura. El sistema de la computadora calcula el DPV cada pocos segundos, y usa un valor acumulado para estimar el consumo del agua por la planta y programar el riego (Barnett, 1990).



Figura 3.2.15 Los sistemas de asperjado pueden ser controlados con un aparato denominado "humidistat", el cual monitorea la humedad relativa. Un "humidistat" debe ser protegido de la exposición directa a la humedad.

El aparato básico para el control de la humedad, es el llamado "humidistat", que tiene un sensor para la humedad relativa, conectado a un interruptor eléctrico (Fig. 3.2.15). Los "humidistat" pueden ser conectados con una banda metálica para cerrarse cuando la humedad aumenta, conectando un sistema de reducción de humedad, o cuando la humedad se reduce, activando un ciclo de humedecimiento. De cualquier forma, la reducción de la humedad puede ser programada dentro de una etapa de descondensación en el panel de control ambiental, el cual sincroniza la apertura de ventilas y activa el sistema de calentamiento, y puede ser operado tanto manual como automáticamente (Fig. 3.2.16). Los sistemas de control ambiental asistidos por computadora, son capaces de monitorear higrómetros eléctricos continuamente, y generan registros permanentes de humedad relativa y de otras variables climáticas relacionadas (Los sistemas de control ambiental son discutidos con mayor detalle en el volumen uno de esta serie).

3.2.5.2 Niebla y asperjado

Son tres los tipos básicos de controladores de asperjado disponibles: relojes, sensores mecánicos como la "hoja artificial", y equipos de control asistidos por computadora que monitorean humedad o energía radiante. Con los relojes, el viverista establece las horas de operación y de duración de los asperjados en un mecanismo de relojería (Fig. 3.2.17A/B). Estos controles relativamente simples y

baratos, con frecuencia están conectados en serie para proporcionar asperjados intermitentes durante ciertas horas. La hoja artificial es otro sistema de control no caro, consistente de un cuadro de alambre con gasa sobre el extremo de un brazo de balanza (Fig. 3.2.17C). Cuando el asperjado que se ha acumulado sobre la hoja se hace lo suficientemente pesado, el brazo de balanza topa, activando un interruptor de mercurio que apaga el sistema de asperjado. Después que el agua se evapora de la hoja, el brazo de balanza asciende nuevamente, hasta la posición de encendido. Entonces, se repite el ciclo de asperjado a intervalos que son determinados por la tasa de evaporación en el área de cultivo.

La nebulización requiere de controles electrónicos más sofisticados. Las nuevas computadoras ambientales monitorean la humedad y otros factores, como la radiación solar, e integran esta información para activar el sistema de niebla.



C

Figura 3.2.17 Están disponibles varios tipos de sistemas de control de aspersión, incluyendo relojes mecánicos (A y B), y la "hoja artificial" (C).

Es difícil mantener niveles óptimos de humedad en viveros que producen en contenedores, porque la humedad relativa varía tanto como la temperatura. Los niveles de humedad ideales también cambian en la estación de cultivo, dependiendo de la etapa de desarrollo de la plántula. Las elevadas humedades relativas son más importantes durante la germinación de la semilla y la emergencia de la plántula. La humedad relativa objetivo durante la fase de establecimiento es de 80%, con un intervalo de 60 a 90%.y durante la fase de crecimiento rápido, la HR objetivo desciende a 60%, con un intervalo de 50 a 80%. Durante la fase de endurecimiento, la humedad relativa del ambiente exterior normalmente es aceptable.

Excepto para la propagación vegetativa, no son deseables humedades relativas muy elevadas (90 a 100%), pues el crecimiento de hongos fitopatógenos, musgos, algas y hepáticas, es estimulado bajo tales condiciones, y puede resultar en la reducción de la calidad de las plántulas o aún en mortalidad.

Muchos viveros que producen en contenedores no están diseñados con equipo específico para el control de la humedad, pero utilizan su equipo de calentamiento, ventilación, y riego, para mantener humedades dentro de los intervalos deseados.

3.2.7 Literatura Citada

- Aldrich, R. A.; Bartok, J. W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Ithaca, NY: Cornell University, Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- ASHRAE, 1989. ASHRAE Handbook: fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc. 792 p.
- Barrett, J. 1990. Plants and water 101: understanding VPD. Grower Talks, September 1990: 48-52.
- Clawson, K. L.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J. Jr. 1989. Evaluating plant moisture stress with canopy temperature differences. *Agronomy Journal* 81:858-863.
- Gaffney, J. J. 1978. Humidity: basic principles and measurement techniques. *Hort Science* 13(5):551-555.
- Garzoli, K. 1988. Greenhouses. Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service. 185 p.
- Gordon, I. 1989. Fogging systems for propagation. *International Plant Propagators Society Combined Proceedings* 38:84-86.
- 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. COJFRC Symposium Proceedings 0-P-10*. 1981, Sept. 14-16. Toronto, ON. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service. Great Lakes Forest Research Centre: 129-138
- Hanan, J. J.; Holley, W. D.; Goldsberry, K. L. 1978. Greenhouse management. New York: Springer-Verlag. 530 p.
- Hartmann, H. T.; Kester, D. E. 1983. Plant propagation: principles and practices. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 727 p.
- Jarvis, P. G. 1980. Stomatal response to water stress in conifers. In: Turner, N.; Kramer, P., eds. *Adaption of plants to water and high temperature stress*. Oxford: Blackwell: 105-122.
- Kramer, P. J. 1983. Water relations of plants. New York: Academic Press. 489 p.
- Kramer, P. J.; Kozlowski, T. T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.
- Krizek, D. T.; Bailey, W. A.; Klueter, H. H. 1971. Effects of relative humidity and type of container on the growth of F1 hybrid annuals in controlled environments. *American Journal of Botany* 58:544-551.
- Mastalerz, J. W. 1977. The greenhouse environment. New York: John Wiley and Sons. 629 p.
- Peterson, M. J.; Sutherland, J. R.; Tuller, S. E. 1988. Greenhouse environment and epidemiology of grey mould of container grown Douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forestry Research* 18(8): 974-980.
- Peterson, M. J.; Sutherland, J. R. 1989. Grey mould control by seedling canopy humidity reduction through under bench ventilation and styroblock aeration. FRDA Rep. 077. Victoria, BC: Canadian Forestry Service and BC Ministry of Forests. 16 p.
- Schroeder, M. J.; Buck, C. C. 1970. Fire weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. *Agric. Handbk.* 360. Washington, DC: USDA Forest Service. 229 p.
- Seiler, J. R.; Johnson, J. D. 1984. Abnormal needle morphology in loblolly pine induced by low humidity. *Hort Science* 19(4):521-522.
- Van de Sanden, P.A.C.M. 1985. Effect of air humidity on grow thand water exchange of cucumber seedlings: preliminary report. *Acta Horticultura* 174:259-267.

Weed, J. 1989. A look at fog cooling systems.
Greenhouse Manager 8(6):110-113.



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

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 3
Luz**

Contenido

3.3.1 Introducción	X
3.3.1.1 Biofísica de la luz	X
3.3.1.2 Definiciones y unidades	X
3.3.2 Papel de la luz en el crecimiento y desarrollo de plantas	X
3.3.2.1 Fotosíntesis	X
Efecto de la intensidad de la luz	X
Uso de luz artificial	X
3.3.2.2 Fotomorfogénesis	X
El sistema fitocromo	X
Extendiendo el fotoperiodo	X
Acortando el fotoperiodo	X
Fototropismo	X
3.3.3 Niveles óptimos de luz	X
3.3.3.1 Programación del cultivo	X
3.3.3.2 Fase de establecimiento	X
3.3.3.3 Fase de crecimiento rápido	X
3.3.3.4 Fase de endurecimiento	X
3.3.4 Modificando la luz en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.3.4.1 Efecto de las cubiertas estructurales	X
3.3.4.2 Sombreado el área de cultivo	X
3.3.4.3 Tipos de lámparas	X
Lámparas incandescentes	X
Lámparas fluorescentes	X
Lámparas de descarga de alta intensidad	X
Reflectores	X
3.3.4.4 Alumbrado fotosintético	X
Intensidad de la luz	X
Calidad de la luz	X
Ubicación y fijación de las lámparas	X
3.3.4.5 Alumbrado fotoperiódico	X
Tipos de alumbrado fotoperiódico	X
Intensidad y calidad de la luz	X
Fijación y posición de las lámparas	X
3.3.4.6 Tratamiento de día corto	X
3.3.5 Sistemas de monitoreo y control de la luz	X
3.3.5.1 Midiendo los niveles de luz	X
Fotómetros	X
Radiómetros	X
3.3.5.2 Sistemas de control	X
3.3.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.3.7 Literatura Citada	X

3.2.1 Introducción

La naturaleza de la luz ha fascinado al ser humano durante miles de años, pero apenas tiene poco más de un siglo que su verdadera naturaleza comenzó a ser comprendida por éste. La luz es el más complejo y variable de los factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas, y es el más importante (Smith y Whitelam, 1990). Además de su importancia biológica, la luz tiene implicaciones prácticas y económicas en los viveros forestales que producen en contenedores. La luz es un fenómeno subjetivo, así que los administradores de viveros deben recordar que las respuestas a la luz que observen en sus plantas no son las mismas, en términos de longitud de onda (color) o de intensidad (Fig. 3.3.1).

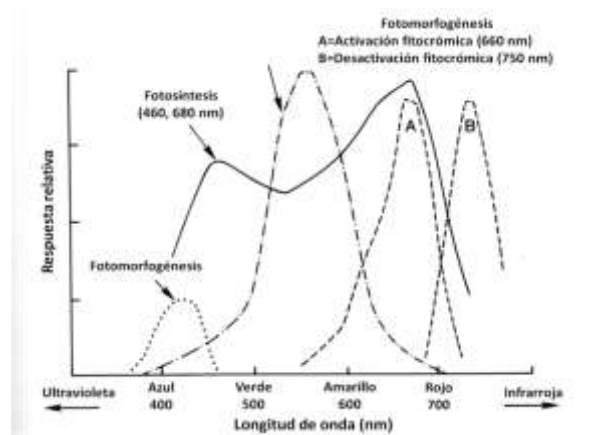


Figura 3.3.1 La sensibilidad del ojo humano a la radiación solar difiere considerablemente de la de las plantas, que responden en varias formas a distintas longitudes de onda.

3.3.1.1 Biofísica de la luz

La **luz** es definida como la parte del espectro electromagnético que es visible al ojo humano. Nuestro planeta recibe una amplia variedad de ondas electromagnéticas tanto de fuentes naturales como artificiales. Esta radiación puede ser descrita en términos de longitud de onda o de energía (Fig. 3.3.2). Ya que las longitudes de onda más cortas llevan más energía que las longitudes de onda más largas, los rayos cósmicos son mortales, mientras que las ondas de televisión y radio pasan a través de muchos objetos sin causarles daño. Los intervalos del espectro electromagnético oscilan desde las longitudes de onda muy largas, las de radio AM (1 km), a la luz visible (10^{-9} m), y hasta las longitudes

extremadamente cortas, de onda cósmica (10-15 m) (Fig. 3.3.2).

El término **luz solar** es el nombre común para la radiación electromagnética que se origina en nuestro sol, a unos 150 millones de kilómetros (93 millones de millas). Todos los materiales bajo el cero absoluto, es decir -273°C (-469°F), emiten alguna radiación electromagnética, y la longitud de onda de esta radiación es función de la temperatura de la fuente. El sol, con una temperatura superficial de 6,000°C (10,800°F), produce un amplio intervalo de radiación electromagnética; 99% de la cual está entre los 200 y los 2,000 nanómetros (nm) de longitud de onda (Fig. 3.3.3).

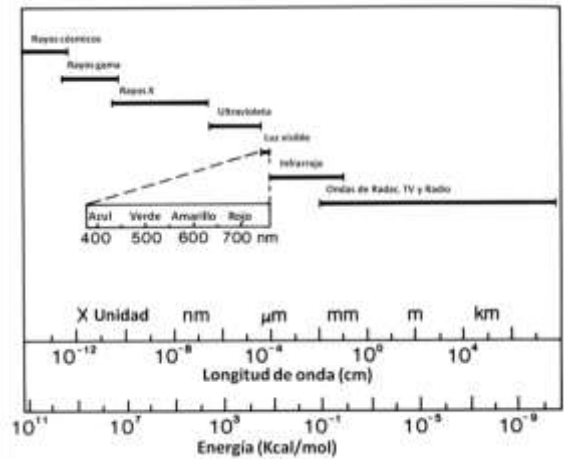


Figura 3.3.2 El espectro electromagnético varía desde los rayos cósmicos a través de la luz visible, de la radiación infrarroja a las ondas de radio y televisión (modificado de Withrow y Withrow, 1956).

La atmósfera terrestre selectivamente nos protege de la mayor parte de la radiación ultravioleta, y también impide el paso a algunas longitudes de onda visibles (Fig. 3.3.3). Puesto que las nubes absorben y reflejan mucha luz visible, la cantidad total de radiación solar que está disponible para el cultivo de plantas está afectado por la latitud y por el número de días despejados de nubes (Fig. 3.3.4). Debido a esta variación geográfica, muchos invernaderos hortícolas están localizados en la región suroeste de los Estados Unidos, donde el cielo se mantiene soleado a través del año (los efectos del clima en la localización de viveros forestales son descritos con más detalle en el volumen uno de esta serie).

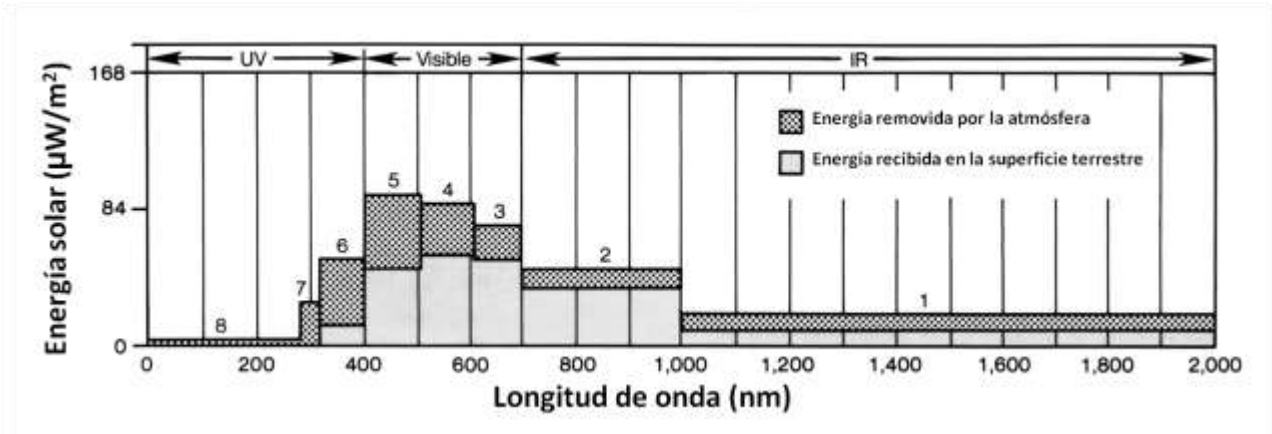


Figura 3.3.3 La energía en el espectro solar puede ser dividida en 8 bandas (Cuadro 3.3.1), que se relacionan con sus efectos en el crecimiento de la planta. La atmósfera terrestre filtra selectivamente mucha de la radiación más intensa (Adaptado de Reifsnnyder y Lull, 1965).

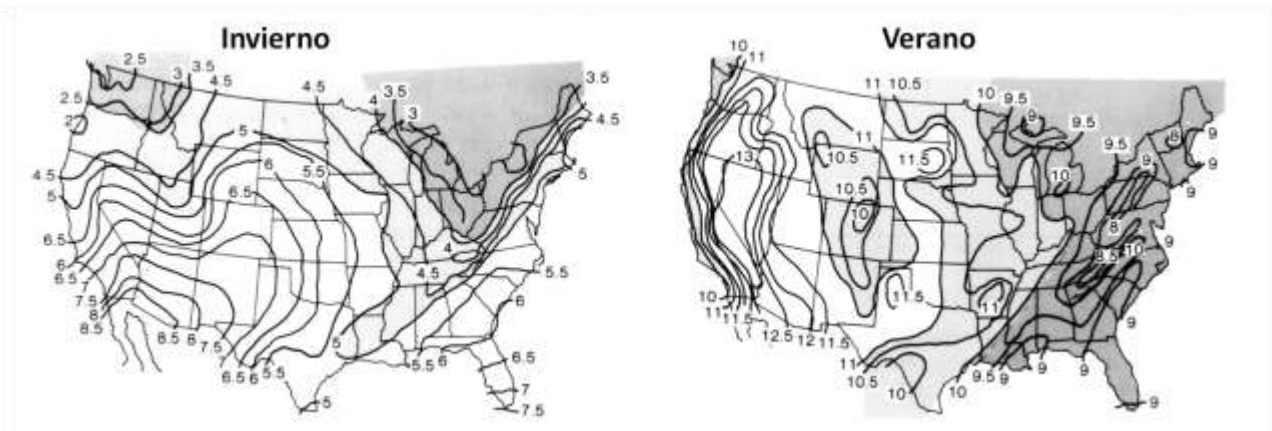


Figura 3.3.4 La cantidad de energía solar que está disponible para el cultivo de especies forestales, es afectada por la cubierta de nubes, pues es reflejada en función del promedio de horas diarias de sol para los Estados Unidos (De USDA, 1941).

3.3.1.2 Definiciones y unidades

Los diversos tipos de radiación electromagnética originados en el sol pueden ser identificados por su longitud de onda. Aunque cualquier unidad de longitud puede ser empleada, la longitud de onda de la radiación solar comúnmente es medida en nanómetros ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ nm}$). También están disponibles las conversiones a unidades inglesas (Bickford y Dunn, 1972), pero casi no son empleadas. La porción del espectro electromagnético que tiene significancia biológica puede ser separada, a grandes rasgos, en **radiación ultravioleta** ($\text{UV} = < 400\text{ nm}$), **luz visible** ($400\text{ a } 700\text{ nm}$), y **radiación infrarroja** ($\text{IR} = > 700\text{ nm}$) (Fig. 3.3.3).

Las longitudes de onda que tienen significancia en la horticultura, han sido divididas en ocho bandas, con base en sus

efectos biológicos (Cuadro 3.3.1). Dos procesos fisiológicos específicos que son importantes para el cultivo de plantas pueden ser manipulados culturalmente mediante luz de longitudes de onda específicas. La fotosíntesis, es mayor en la banda roja (banda 3), con alguna actividad en las longitudes de onda azul-verde (banda 5), mientras que la fotomorfogénesis es más afectada por la luz roja lejana, roja, y azul-violeta (bandas 2, 3 y 5). Muchas de las otras longitudes de onda son reflejadas, dando a las plantas su característico color verde. Sin embargo, para propósitos prácticos, los científicos combinan las longitudes de onda de 400 a 700 nm en un sólo término: **radiación fotosintéticamente activa (RFA)**.

La energía radiante puede ser medida en muchas formas distintas, y han sido utilizados numerosos términos y unidades. La elección depende del uso; para propósitos hortícolas, la radiación debería ser medida en términos de poder (watts), o energía fotón (micro-moles) dentro del espectro de la RFA. Aunque éstos

también describen a la luz en términos de unidades de poder, los ingenieros que estudian el alumbrado usan unidades que reflejan la sensibilidad del ojo humano dentro del espectro visible (lux). Son tres los sistemas comúnmente utilizados para describir y medir la luz (Cuadro 3.3.2).

Cuadro 3.3.1 El "Dutch Plant Irradiation Committee" delineó ocho bandas separadas en el espectro electromagnético, para describir los diferentes efectos biológicos de la luz solar.

Banda	Longitud de onda (nm)	Visibilidad/color	Efectos biológicos
1	> 1,000	Invisible (IR)	Ningún efecto bioquímico específico – absorbida y convertida en calor
2	700 a 1,000	Invisible (IR)	Elongación del tallo
3	600 a 690	Rojo	Fuerte absorción de clorofila y actividad fotosintética*; también la región de mayor efectividad fotoperiódica
4	500 a 590	Naranja, Amarillo y Verde	Baja efectividad fotosintética*
5	400 a 490	Azul, Violeta	Moderada absorción de clorofila y actividad fotosintética; fotomorfogénesis no fitocrómica
6	315 a 390	Invisible (UV)	Fluorescente
7	280 a 314	Invisible (UV)	Actividad germicida
8	< 280	Invisible (UV)	Sin efectos bioquímicos específicos; absorbida por la atmósfera

IR: Infrarrojo; UV: Ultravioleta;

* Las longitudes de onda de 400 a 700 nm (bandas 3 a 5), son también conocidas colectivamente como radiación fotosintéticamente activa (RFA).

Fuente: modificado de Reifsnnyder y Lull (1965).

Cuadro 3.3.2 Unidades y factores de conversión para medirla en viveros que producen en contenedores (la selección de unidades depende del tipo de aplicación).

Unidades de energía
Unidades preferidas micromoles por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$)
Otras unidades: microeinsteins por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{E/s/m}^2$)
Conversiones: $1 \mu\text{mol/s/m}^2 = 1 \mu\text{E/s/m}^2$ $1 \text{ W/m}^2 = 4.6 \mu\text{mol/s/m}^2$ $1 \mu\text{mol/s/m}^2 = 51.2 \text{ lx}$
Unidades de radiación
Unidades preferidas: watts por metro cuadrado (W/m^2)
Otras unidades: watts por pie cuadrado (W/ft^2) langleys por día (Ly/d) calorías por centímetro cuadrado (cal/cm^2)
Conversiones*: $1 \text{ W/m}^2 = 2.07 \text{ Ly/d}$ $1 \text{ Ly/d} = 0.484 \text{ W/m}^2$ $1 \text{ W/m}^2 = 10.8 \text{ W/ft}^2$ $1 \text{ W/ft}^2 = 0.093 \text{ W/m}^2$
Unidades de iluminación
Unidades preferidas $1 \text{ lux (lx)} = 1 \text{ lumen por metro cuadrado (lumen/m}^2)$
Conversiones $1 \text{ lx} = 0.09 \text{ fc}$ $1 \text{ fc} = 10.76 \text{ lx}$

* Las conversiones entre unidades de energía, radiación e iluminación, son muy complicadas y serán diferentes para cada fuente de luz (ver Cuadro 3.3.3). La curva de distribución espectral de la salida radiante de la fuente debe ser conocida para hacer la conversión. Las anteriores conversiones asumen una curva de distribución espectral plana, sobre las longitudes de onda de la RFA.

Fuentes: ASHRAE (1989), Thimijan y Heme (1983), Hanan *et al.* (1978), Hansen y Biggs (1979).

Unidades de energía – micromoles por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$) miden la tasa de energía radiante (densidad del flujo fotónico) por unidad de área. Simplemente dicho, las unidades de energía describen la cantidad de poder (en el caso de la luz solar, poder solar), que es interceptado por un objeto (Bickford y Dunn, 1972). La cantidad de energía por unidad varía inversamente con la longitud de onda: 1 mol de luz roja (670 nm) lleva 47,000 calorías, comparado con 1 mol de luz azul (470 nm), que lleva 60,000 calorías (Reifsnnyder y Lull, 1965). Las unidades de energía siempre están en las longitudes de onda de la RFA, a menos que otra cosa se suponga. Un mol de fotones es denominado también un einstein (ASHRAE, 1989).

Unidades de radiación - watts por metro cuadrado (W/m^2) – también miden la energía radiante por unidad de área, pero deben establecerse unas longitudes de onda específicas e intervalos de tiempo. Las unidades de radiación con frecuencia son usadas por los ecólogos y fisiólogos vegetales para describir la cantidad total de radiación solar que es recibida en una determinada localidad. En horticultura, las unidades de radiación son más útiles para la descripción de la intensidad del alumbrado artificial, pues las lámparas están graduadas en watts.

Unidades de iluminación - lux (lx) - son una medida estándar de luz artificial por unidad de área a una distancia dada de la fuente. Estas cubren la radiación visible, de 380 a 710 nm, con un máximo a 555 nm, correspondiente a la sensibilidad visual del ojo humano (Fig. 3.3.1). La unidad estándar de iluminación es el lumen. Un lumen que está uniformemente distribuido sobre un área de 1 m lineal es definido como 1 lx; un lumen distribuido sobre 1 pie cuadrado es 1 pie-candela (Cuadro 3.3.2). Aunque la sensibilidad del ojo humano al espectro es muy distinta de la necesaria para las plantas, los instrumentos más baratos para medir la luz son calibrados en lux o en pies-candela.

La mejor unidad de luz para ser empleada en horticultura, ha sido objeto de mucho debate. Las mediciones de radiación y las de energía,

están relacionadas con los mismos aspectos de la luz, pero para propósitos hortícolas, el uso de unidades de energía ha sido recomendado como el más apropiado. Cuando las unidades de radiación deben ser usadas, como al trabajar con luz artificial, los factores para la conversión a unidades de energía variarán con el tipo de lámpara (Cuadro 3.3.3). Pueden consultarse unas tablas completas de conversión en Thimijan y Heins (1983).

Existen dos unidades comunes para la medición de la energía, que son iguales numéricamente (Cuadro 3.3.2): los micromoles o microeinsteins por segundo por metro cuadrado ($\mu\text{mol/s/m}^2$ o uE/s/m^2). Aunque los microeinsteins son comúnmente utilizados por los fisiólogos de plantas (Kramer y Kozlowski, 1979), los micromoles son los más ampliamente recomendados (Thimijan y Heins, 1983) y serán usados en este manual. Ya que las unidades de iluminación (lux) son la forma más común de medir la luz en el vivero, las mediciones de la luz serán dadas tanto en unidades de iluminación como en unidades de energía. No obstante, la conversión entre unidades de energía e iluminación, varía con la fuente de luz (Cuadro 3.3.3). **Para evitar confusión y mantener precisión, el valor en micromoles será seguido por su aproximada conversión a luxes entre paréntesis.** Por ejemplo, hay una fuerte cantidad de luz en un día soleado [$2,000 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~108,000 lux)] en comparación con uno muy nublado [$60 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~3,200 lux)] (Cuadro 3.3.3). Para los que usan unidades inglesas de iluminación pies-candela, la conversión es sencilla dado que los valores difieren por un factor de 10 (1 pie candela = 10.8 lx).

Deben considerarse las unidades apropiadas cuando se compra un medidor de luz o cuando esta se mide. Para propósitos operativos, los viveristas deben usar uno que mida las longitudes de onda relevantes. Para medir la cantidad de luz natural o luz artificial que está disponible para la fotosíntesis, debería medirse la RFA. Para la prevención de la dormancia, sólo se requiere medir la luz roja y roja lejana (ver sección 3.3.5, para más información sobre los medidores de luz).

Cuadro 3.3.3 Comparaciones relativas de unidades de luz para radiación solar y lámparas simples de algunos sistemas típicos de alumbrado artificial*.

Fuente de luz	Radiación (W/m ²)	Energía (μmol/s/m ²)	Iluminación (lx)	Conversión aproximada de unidades energía-iluminación
Radiación solar (al nivel del mar)				
Luz plena	450.00	2,000.0	108,000	54
Densamente nublado	15.00	60.0	3,200	54
Luz lunar plena	0.05	0.2	10	54
Alumbrado artificial +				
Incandescente (100 W)	0.20	1.2	59	49
Halógeno metal (400W)	4.00	19.0	1,330	70
Fluorescente - blanca-fría (40W)	0.30	1.3	103	79
Sodio – alta presión (400W)	4.00	20.0	1,670	84
Sodio – baja presión (180W)	2.00	10.0	1,090	109

* Para la Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA): 400 a 700 nm.

+ Valores estimados para la lámpara simple montada 2 m sobre una superficie de cultivo de 3m². El espaciamiento puede variar con el tipo de lámpara y objetivos del viverista. Bajo condiciones de operación, las intensidades lumínicas serán mucho mayores, debido al traslape de lámparas adyacentes.

Fuente: modificado de Thimijan y Heins (1983).

3.3.2 Papel de la Luz en el Crecimiento y Desarrollo de Plantas de Especies de Árboles

Son tres las principales propiedades de la luz que afectan el crecimiento de la planta: intensidad, duración, y calidad (Kramery Kozlowski, 1979). Para la acelerada tasa de crecimiento que es deseable en un vivero forestal, la fuente de luz debe proporcionar suficiente energía radiante a la fotosíntesis. La intensidad de la luz es también un factor para prevenir la dormancia, aunque la intensidad requerida es mucho menor. La duración de la luz está primariamente relacionada con la longitud del día (en la actualidad, la longitud del periodo de oscuridad es más importante) que se requiere para prolongar el crecimiento vegetativo. La calidad de la luz se refiere al hecho de que distintas longitudes de onda se relacionan con diferentes funciones en las plantas; sin embargo, dentro del intervalo de la RFA, la calidad de la luz considerada menos importante que su intensidad y duración (ASHRAE, 1989).

Sobre una base fisiológica, los efectos de la luz en el crecimiento de plántulas de especies forestales y su desarrollo, pueden ser agrupadas en dos categorías: los elevados requerimientos en energía por la fotosíntesis, y los efectos de baja energía que son colectivamente conocidos como fotomorfogénesis (Kramer y Kozlowski, 1979). Cada una de estas respuestas es sensitiva a longitudes de onda específicas (Fig. 3.3.1):

- **Fotosíntesis** - La energía radiante (muchas longitudes de onda de la RFA, pero predominantemente la roja) es capturada por los pigmentos caroteno y clorofila, y convertida a energía química necesaria para el crecimiento y metabolismo de la planta, usando dióxido de carbono y agua como materias primas.
- **Fotomorfogénesis** - La energía radiante (longitudes de onda rojo lejano, rojo, y azul) es capturada por el fitocromo y otros pigmentos. El fitocromo es sensible a la porción del rojo al rojo lejano, y actúa como un sensor ambiental que mide la longitud del día. El sistema fitocromo

controla la fenología de la plántula, incluyendo procesos como la germinación de la semilla y la aparición de yemas, y también tiene que ver con otras reacciones morfológicas, como la respuesta a la sombra. La luz azul es importante para un desarrollo morfológico normal, particularmente en relación con la construcción de ramas y parte aérea en general.

3.3.2.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis es uno de los procesos químicos más importantes en nuestro planeta. Muchas formas de vida no serían posibles sin este proceso. Las plantas producen los bloques básicos de la vida como carbohidratos, aminoácidos, y grasas, y también generan oxígeno como un bioproducto de la fotosíntesis. El oxígeno es esencial para la respiración de todos los organismos.

La mayoría de la fotosíntesis toma lugar en el follaje; la clorofila, que da a las plantas su color verde, está contenida en los cloroplastos de las hojas. El agua es absorbida en las raíces y transportada a las hojas, donde es combinada con dióxido de carbono, en presencia de luz para sintetizar azúcares. Los productos de la fotosíntesis son transportados a través de la planta y son utilizados en la respiración, que es en esencia una reacción química inversa a la fotosíntesis (Fig. 3.3.5). La respiración, que ocurre en la oscuridad y también en presencia de luz, libera la energía química de los fotosintatos para una amplia variedad de funciones de crecimiento y mantenimiento (Kramer y Kozlowski, 1979).

La fotosíntesis neta es medida determinando la cantidad de dióxido de carbono que es removido del aire alrededor de la hoja o planta. La tasa fotosintética total es calculada sumando la cantidad de dióxido de carbono que es liberada durante la respiración a la absorbida del aire. El crecimiento de la planta está determinado por la cantidad de fotosintatos remanentes de la respiración, y la

tasa de fotosíntesis neta es más relevante para los horticultores que la tasa total (Mastarlez, 1977). La tasa de fotosíntesis neta está afectada por varias variables ambientales (incluyendo la disponibilidad de agua y dióxido de carbono), pero está fuertemente controlada por la temperatura, que determina la tasa con la que un fotosintato es empleado en la respiración (Fig. 3.3.6).

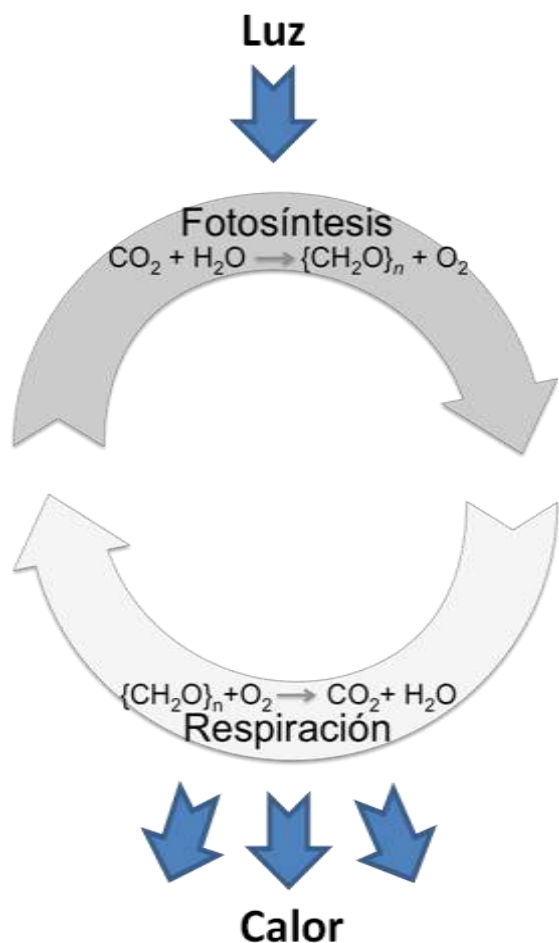


Figura 3.3.5 La fotosíntesis y la respiración son procesos recíprocos. En la fotosíntesis, las plantas verdes usan la energía de la luz para convertir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) en carbohidratos (CH₂O), liberando oxígeno (O₂) a la atmósfera. Todos los organismos queman estos carbohidratos en presencia de O₂ produciendo energía (calor), dióxido de carbono, y agua (modificado de Gates, 1971).

Efecto de la intensidad de la luz. La fotosíntesis aumenta en forma curvilínea con la intensidad de la luz (Fig. 3.3.7). La respuesta varía entre especies, y está sujeta a los niveles de otros factores limitativos, especialmente temperatura, dióxido de carbono (CO₂), y agua.

Si la intensidad luminosa es muy baja (0 a 20 μmol/s/m², o aproximadamente 0 a 1,100 lx), la tasa fotosintética será menor que la respiración, y habrá una pérdida neta de fotosintatos (A, Fig. 3.3.7). Conforme la luz aumenta de 20 a 50 μmol/s/m² (~1,100 a 2,700 lx), la fotosíntesis igualará a la respiración, y no habrá intercambio neto de CO₂. Este nivel es conocido como punto de compensación por luz (B, Fig. 3.3.7), el cual es importante, pues determina la cantidad mínima absoluta de luz que debe ser provista para mantener vivo el cultivo.

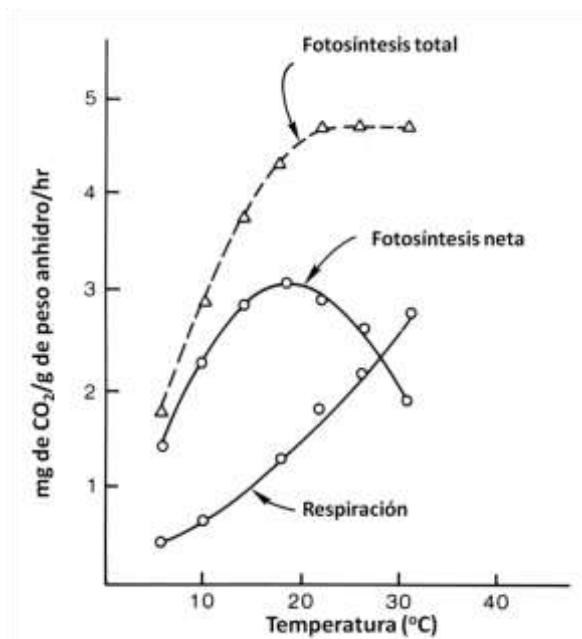


Figura 3.3.6 La fotosíntesis total y la respiración aumentan con la temperatura. La diferencia entre estos procesos, es conocida como fotosíntesis neta, y representa la cantidad de fotosintatos que está disponible para el crecimiento y mantenimiento (Modificado de Mastarlez, 1977).

Conforme la intensidad de la luz es aumentada más allá del punto de compensación, la fotosíntesis aumenta rápidamente hasta aproximadamente 180 μmol/s/m² (~9,700 lx); por encima de este punto (C, Fig. 3.3.7), la fotosíntesis continúa, pero a una menor tasa. Si la intensidad luminosa continúa aumentando, la planta alcanzará un punto donde la curva de respuesta fotosintética sea plana, el punto de saturación por luz (D, Fig. 3.3.7). Más allá de este punto de intensidad lumínica, no resulta útil proporcionar más luz; es más, será detrimental debido al calor adicional que ésta producirá.

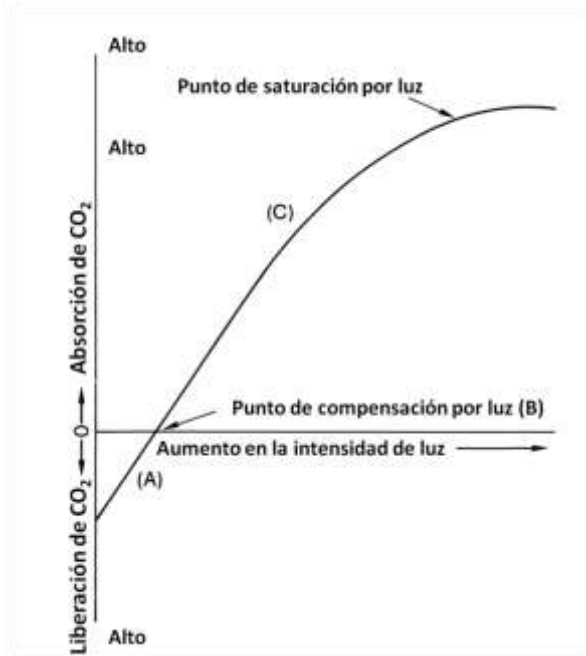


Figura 3.3.7 La intensidad luminosa tiene un fuerte efecto en la fotosíntesis. Con poca luz, la respiración es mayor que la fotosíntesis y hay una pérdida neta en fotosintatos (A). El punto de compensación por luz (B) es donde la fotosíntesis iguala la respiración. Con incremento en la luz, la tasa fotosintética aumenta rápidamente hasta el punto (C), a partir del cual, la respuesta se reduce poco a poco. Después de este punto, la tasa fotosintética gradualmente disminuye, hasta que se alcanza el punto de saturación por luz (D); a partir de este punto, no hay aumento en la fotosíntesis aunque aumente la intensidad luminosa, pudiendo tener un efecto detrimental. Las intensidades luminosas exactas para los diferentes puntos pueden variar con las especies (De Hartmann, Flocker, y Kofranek, 1981. Plant science: growth, development, and utilization of cultivated plants. p. 151. Reimpreso con autorización de Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N.J.).

La saturación se presenta a diferentes niveles de luz para distintas especies (Fig. 3.3.8A; Cuadro 3.3.4) y a mayores intensidades de luz bajo elevadas temperaturas y altas concentraciones de CO₂ (Kramer y Kozlowski, 1979). El punto de saturación por luz también varía entre diferentes hojas de la misma planta; las hojas que se desarrollan a la sombra ("hojas de sombra") alcanzan la saturación por luz con intensidades mucho menores que aquellas que se desarrollan a plena luz ("hojas de sol") (Fig. 3.3.8B). Las intensidades de saturación por luz pueden ser tanto como 3 veces superiores para una planta entera que para una hoja individual, debido al sombreado mutuo (Nelson, 1985). Considerando que en los viveros forestales

típicamente se cultivan plántulas a elevadas densidades, la intensidad de saturación por luz puede ser mucho mayor para un bloque de plántulas que para una sola.

Las intensidades luminosas extremadamente elevadas pueden causar "quemaduras por insolación" (Fig. 3.3.9), las cuales técnicamente son denominadas foto-daño o solarización (Levitt, 1980). Las plantas normalmente se adaptan a elevadas intensidades luminosas a través de una variedad de ajustes fisiológicos. Bajo condiciones de tensión, estos mecanismos pueden resultar ineficientes, y el follaje resultar foto-dañado. La susceptibilidad al foto-daño varía con la dureza de las plantas: las plantas dormantes son menos susceptibles, y los tejidos jóvenes y suculentos son particularmente sensibles (Gillies y Vidaver, 1990). Pero aún dormantes, las plantas pueden sufrir de foto-daño. Se ha encontrado que una intensidad de luz excesiva origina clorosis en plántulas de *Picea engelmannii* (Mill.), las cuales fueron embarcadas del vivero a sitios de plantación de gran altitud (Ronco, 1970).

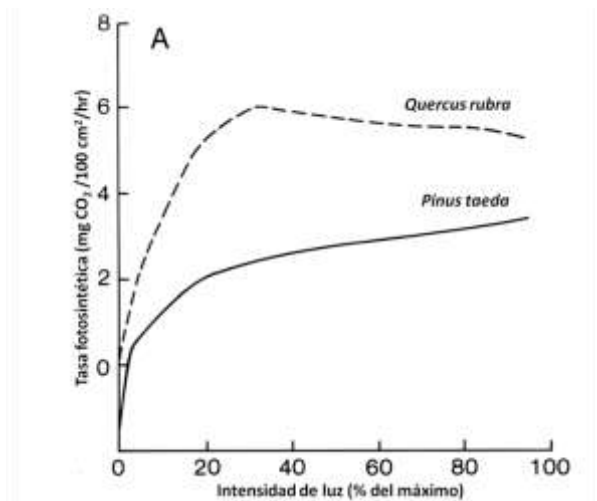


Figura 3.3.8. El punto de saturación por luz (ver Fig. 3.3.7), acontece a menores intensidades luminosas para las especies tolerantes a la sombra, como el *Quercus rubra* L., que en las especies intolerantes a la sombra, como *Pinus taeda* L. (A). La tasa fotosintética para las hojas de sol continúa aumentando con más luz, mientras que las hojas de sombra alcanzan la saturación por luz a niveles de luz relativamente bajos (B). (A, adaptado de Kramer y Decker, 1944; B, de Boysen-Jensen y Muller, 1929; cits. por Hanan et al., 1978).

Uso de luz artificial. Es posible compensar a través de labores de cultivo la falta de luz solar mediante luz suplementaria, pero los sistemas de alumbrado de alta intensidad son caros de instalar y de operar (Fig. 3.3.10A). El alumbrado fotosintético adicional solamente fue utilizado en 5.4% de los viveros forestales encuestados en los Estados Unidos y Canadá. Usualmente se considera que resulta no económico, excepto para las siguientes circunstancias:

- Durante el invierno en latitudes extremas, cuando las intensidades de la luz solar son bajas y los días son breves. En el caso de cultivos hortícolas, se considera práctico el alumbrado fotosintético adicional, en

viveros enclavados en sitios que excedan los 40° de latitud (Nelson, 1985).

- Cuando el cultivo es inusualmente valioso, como aquél obtenido de mejoramiento genético forestal (Bongarten y Hanover, 1985).
- Cuando deban ser cultivadas especies demandantes en luz, en sitios frecuentemente con condiciones nubladas o de neblina.

(Las especificaciones y más información aplicada para el alumbrado fotosintético, se proporcionan en la sección 3.3.4.4).

Cuadro 3.3.4 Intensidades de saturación por luz para varias especies forestales

Especies	Intensidad de saturación de luz		Fuente
	$\mu\text{mol/s/m}^2$	Klx	
<i>Larix siberica</i>	100	ND	Environment Canada (1983)
<i>Picea engelmannii</i> (Engelmann Spruce)	420	50	Ronco (1970)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Picea sitchensis</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Tsuga heterophylla</i>	550	30	Krueger y Ruth (1969)
<i>Quercus alba</i>	270	15	Krueger y Ruth (1969)
<i>Quercus rubra</i>	650	35	Krueger y Ruth (1969)
<i>Cornus</i> spp.	650	35	Krueger y Ruth (1969)
<i>Picea engelmannii</i> (Colorado Blue Spruce)	400-1,500	50-80	Tinus (1970)
<i>Alnus rubra</i>	920	50	Krueger y Ruth (1969)
<i>Pinus taeda</i>	1,800+	100+	Kramer y Decker (1944)
<i>Pinus contorta</i>	2,200+	120+	Ronco (1970)
<i>Pinus ponderosa</i>	2,200+	120+	Tinus (1970)

ND: No disponible



Figura 3.3.9 El follaje de las especies que crecen bajo sombra durante la parte temprana de la estación de cultivo, se adapta a las condiciones de sombra. Si las plantas son removidas a luz solar plena sin un adecuado acondicionamiento, estas resultaran foto-dañadas. El follaje dañado comúnmente se torna clorótico o de un color bronce.



A



B

Figura 3.3.10 La fotosíntesis requiere cantidades relativamente altas de luz, así que las lámparas de alta intensidad deben ser arregladas cercanas entre sí (A). El alumbrado foterperiódico (B), solamente requiere intensidad luminosa relativamente baja, por lo que las luces pueden ser colocadas espaciadas entre sí.

3.3.2.2 Fotomorfogénesis

Hay muchas y diferentes respuestas fotomorfogénicas en las plantas, pero con mucho, la más importante es el fotoperiodismo, que es la respuesta de las plantas a la longitud relativa del día y la noche. En horticultura, los términos fotoperiodo y longitud del día significan esencialmente lo

mismo, y se usan indistintamente. La capacidad de percibir la longitud relativa de día, está controlada por un pigmento sensible a la luz, el fitocromo (Smith y Whitelam, 1990).

El sistema fitocromo. El fitocromo es un pigmento azul-verdoso existente en dos formas que responden a la razón de luz roja (R = 660 nm) a roja lejana (RL = 735 nm). La luz roja convierte la forma inactiva de éste a la activa, y la luz roja lejana reinvierte la reacción. La luz de día, que contiene una elevada razón R:RL, convierte el fitocromo a su forma activa; en la oscuridad, la forma activa lentamente se revierte a la forma inactiva. El alumbrado fotoperiódico contiene una elevada razón R:RL, por lo que corta el sistema natural eficientemente (Fig. 3.3.11).

El fitocromo está presente en toda la planta, pero es más abundante en los tejidos meristemáticos, como las semillas y las yemas vegetativas o florales (Kramer y Kozlowski, 1979). Éste funciona en todas las etapas del ciclo de vida, y provee a las plantas con información muy valiosa acerca del factor luz en el ambiente. Además de su sensibilidad a la longitud del día, el sistema del fitocromo controla otras funciones fisiológicas importantes, como la germinación de la semilla, el fototropismo, y las respuestas inducidas por la sombra (Smith y Whitelam, 1990).

Los horticultores han identificado una **longitud de día crítica** para cada una de sus especies comerciales, y tradicionalmente dividen sus cultivos en tipos de día largo, de día corto, y de día neutral. Han sido desarrollados diferentes regímenes de cultivo para cada grupo (Hartmann y Kester, 1983). La situación es más simple para el cultivo de especies forestales en contenedores, pues nosotros no estamos interesados en la floración, solamente en la prolongación o terminación del crecimiento de la parte aérea.

Extendiendo el fotoperiodo. El alumbrado fotoperiódico (Fig.3.3.10B) es el uso más común para la luz artificial en horticultura (Bickford y Dunn, 1972). Los viveristas que producen en contenedores, usan el alumbrado

fotoperiódico para extender la longitud del día en todos los tipos de ambiente de cultivo, desde los complejos a cielo abierto, hasta los invernaderos totalmente controlados. En una investigación reciente el 82% de los viveros forestales en los Estados Unidos y Canadá emplearon alumbrado artificial para regular el fotoperiodo.



Figura 3.3.11 El fitocromo es un pigmento vegetal sensible a la longitud relativa del periodo oscuro, y que regula muchas actividades fenológicas y fisiológicas. En los viveros forestales que producen en contenedores, el alumbrado artificial con una elevada razón de luz roja entre roja lejana, se utiliza durante los días cortos en forma natural, para mantener a las plántulas creciendo activamente (Modificado de Hanan *et al.*, 1978).

La extensión del fotoperiodo es crítica para alcanzar las elevadas tasas de crecimiento que son posibles en los viveros que producen en contenedores, especialmente cuando las plántulas de latitudes más el norte, o de elevadas altitudes, son cultivadas en viveros enclavados más al sur o a menores altitudes (Arnott y Mitchell, 1982). Bajo condiciones naturales, la parte aérea crece sólo durante los largos días de verano, y las yemas aparecen y se mantienen dormantes cuando los días se tornan más cortos, hacia el otoño. La extensión del fotoperiodo es importante desde el punto de vista operativo, cuando las plantas no pueden ser cultivadas hasta el tamaño deseado durante las estaciones naturales de cultivo de primavera hasta el otoño, y se hace particularmente valioso cuando han de ser producidos múltiples cultivos en una estación.

Las especies exhiben respuestas variables a la extensión del fotoperiodo. La necesidad de un alumbrado fotoperiódico dependerá de los siguientes tres principales factores:

Localización del vivero. Los viveros de climas tropicales y subtropicales usualmente no proporcionan alumbrado fotoperiódico, pues la mayor parte de sus cultivos crecen en un año. Sin embargo, a través de experimentos en cámaras de cultivo, se ha demostrado que algunas especies tropicales mostrarán un acelerado crecimiento de la parte aérea cuando son producidas bajo longitudes de día extendidas (Kramer y Kozlowski, 1979). En climas templados, los viveros que producen en contenedores especies de una amplia región geográfica, y específicamente de localidades altas o de elevadas latitudes, deberían planear el proporcionar alumbrado fotoperiódico suplementario (Fig. 3.3.12A).

Especies y ecotipo. Las especies que solamente crecen en sitios de gran altitud, como *Picea engelmannii* (Mill.), requerirán siempre de luz fotoperiódica. El grado de respuesta aumenta con la altitud; por ejemplo, algunas especies subalpinas exhiben aparición prematura de yemas (Fig. 3.3.12B). La respuesta de las plántulas de especies que crecen en una amplia región geográfica (por ejemplo, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), dependerá de la fuente de semilla específica; las plantas procedentes de sitios de poca altitud, costeros, crecerán perfectamente bien sin luces, mientras que las plantas de ecotipos de elevadas altitudes o localidades del interior (de los E.U.A.), no podrán crecer sin ésta. Es prudente el uso del alumbrado fotoperiódico cuando se cultiva una mezcla de especies y de ecotipos, o cuando se desconoce la respuesta de todos los lotes, ya que las especies que no responden no son perjudicadas, y los costos de operación son mínimos. Una vez que las plantas emiten una yema terminal dormante, es difícil y/o tardado conseguir reanudar el crecimiento de la parte aérea.

Ciclo de cultivo. Los viveros, que producen más de un cultivo por año, usualmente necesitarán de luces fotoperiódicas para prevenir que sus cultivos tengan una emisión

prematura de yemas en el otoño; lo cual es aún más importante para los cultivos de fines del otoño o de invierno. Por otro lado, los viveros que no tienen restricciones severas de tiempo, y por tanto no necesitan maximizar sus tasas de crecimiento, pueden cultivar perfectamente plantas de calidad aceptable, sin luces fotoperiódicas. No obstante, los lotes de semilla sensibles pueden exhibir una cantidad inaceptable de variación en altura en sus plantas (Fig. 3.3.12C).

Otros factores. La respuesta al alumbrado fotoperiódico es también función de la edad de la planta. Por ejemplo, el *Pinus sylvestris* L. no mostró respuesta a las 6 semanas, pero exhibió un fuerte requerimiento de fotoperiodo a las 8 semanas de edad (Fig. 3.3.13). Se desconoce la edad precisa a la que diferentes especies se hacen sensibles. En muchos viveros que producen en contenedores se debería comenzar con el control fotoperiódico en la germinación. Unas pocas especies, como *Tsuga mertensiana* (Bong.) Carr., son tan sensibles que tendrán emisión prematura de yemas si sus semillas son germinadas en ausencia de alumbrado fotoperiódico (Arnott, 1991). Inclusive, si las luces fotoperiódicas fallan por tan sólo una noche, algunas especies tendrán emisión prematura de yemas (Arnott y Simmons, 1985). (Fig. 3.3.12D). Cuando las plántulas han sido cultivadas con luz fotoperiódica durante largos periodos, puede requerirse de la ampliación de la longitud crítica del día, para continuar con un crecimiento acelerado. Aún con un fotoperiodo de 24 horas, la mayor parte de las especies templadas cultivadas por un tiempo extremadamente largo, eventualmente emitirán yemas (Kramer y Kozlowski, 1979).

Los efectos de un fotoperiodo extendido son también influenciados por la temperatura. Las plántulas de *Picea* sometidas al mismo alumbrado fotoperiódico, crecieron significativamente más en un invernadero calentado, que en un área protegida sin calentar (Arnott y Mitchell, 1982). Los mismos investigadores encontraron que las frías temperaturas nocturnas produjeron plantas más pequeñas con una formación retrasada de

la yema terminal, aún bajo condiciones de alumbrado fotoperiódico.

El alumbrado artificial para la extensión del fotoperiodo, es diferente del utilizado por la fotosíntesis en tres aspectos: **intensidad, calidad, y duración**. La luz para el control de la dormancia actúa como un estimulante; ésta requiere de muy poca potencia y no necesita ser continua. En contraste, la luz requerida para la fotosíntesis es para potencia, lo que explica el por qué esta luz debe ser de alta intensidad y continua (Cathey y Campbell, 1977). La mayor parte de las especies forestales continuarán su crecimiento cuando se les proporcionan $8 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 430 \text{ lx}$) de luz incandescente 3% del tiempo, aunque los requerimientos varían con las especies (Cuadro 3.3.5). Intensidades luminosas fotoperiódicas tan bajas como 0.24 a $0.60 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~ 20 a 50 lx) son electivas con algunas coníferas del norte (Arnott y Mitchell, 1982). Por encima de este **mínimo crítico de intensidad de luz**, la altura de la planta aumenta rápidamente con la intensidad, y parece reducirse después (Figura 3.3.14), y no habrá beneficio adicional proporcionando más luz. El mínimo crítico en la intensidad de la luz varía con la fuente de la semilla: así, cuatro lotes de semilla de *Picea* provenientes del interior de los E.U.A. mostraron mínimos críticos de intensidad de luz oscilando entre 0.24 y $0.96 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~ 20 a 80 lx) (Arnott y Mitchell, 1982). Los límites superiores en los que no se presentó una respuesta de crecimiento adicional, oscilaron de $1.0 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 100 \text{ lx}$) para *Picea engelmannii* B.S.P., hasta $8.6 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 800 \text{ lx}$) para *Picea glauca* (Moench) Voss (Arnott y Macey, 1985).

En cuanto a la calidad de la luz, el objetivo es mantener al fitocromo en su forma activa, utilizando lámparas que generan una elevada razón de longitudes de onda roja (660 nm) a roja lejana (735 nm) (Fig. 3.3.11) (Ver la sección 3.3.4.5 para aplicaciones operativas de la extensión del fotoperiodo).

Acortando el fotoperiodo. Los tratamientos de día corto, son producidos mediante la exclusión de la luz del sol por varias horas al

día (Fig. 3.3.15). Esta técnica ha sido utilizada por muchos años en horticultura para inducir la floración en plantas de día corto (Mastarlez, 1977). Durante los largos días de verano a grandes altitudes, los viveristas que producen plantas en contenedores han encontrado efectivo el uso de tratamientos de día corto para detener el crecimiento en altura, inducir el desarrollo de yemas, y promover rusticidad ante el frío en cultivos de coníferas (Colombo *et al.*, 1982). Estos tratamientos de día corto para detener el crecimiento en altura, más de cultivo, ya que los administradores de viveros pueden inducir el desarrollo de yemas de una manera rápida y uniforme en cualquier época del año (Oldum y Colombo, 1988).



A



B



C



D

Figura 3.3.12 En los viveros forestales que cultivan especies o ecotipos de elevadas latitudes o altitudes (A, derecha abajo), se debe proporcionar alumbrado fotoperiódico para estos lotes de semilla, o crecerán mucho más lento que el resto del cultivo (A, izquierda, abajo), o incluso pueden desarrollar una yema terminal prematuramente en la estación (B). Las especies o ecotipos sensibles pueden ser cultivados sin luz fotoperiódica, pero exhibirán variación extrema en las tasas de crecimiento de la parte aérea (C). Cuando se provee alumbrado fotoperiódico, una talla en la energía por sólo una noche, puede facilitar el desarrollo de la yema terminal, originándose así tasas irregulares de crecimiento (D).

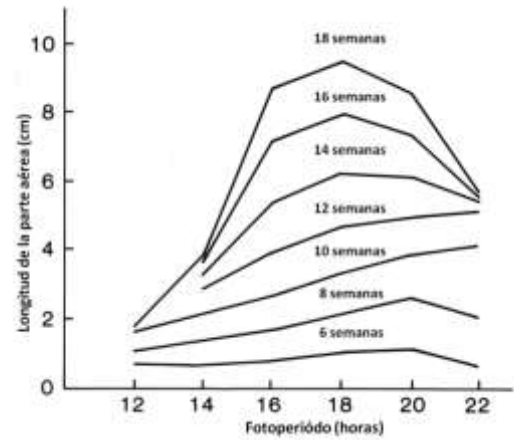


Figura 3.3.13 Aunque algunas especies sensibles requieren de alumbrado fotoperiódico inmediatamente después de la germinación, las plántulas de *Pinus sylvestris* L. no podrán responder sino hasta al cabo de 8 semanas, y la respuesta aumentará con la estación de crecimiento (adaptado de Thompson, 1982).

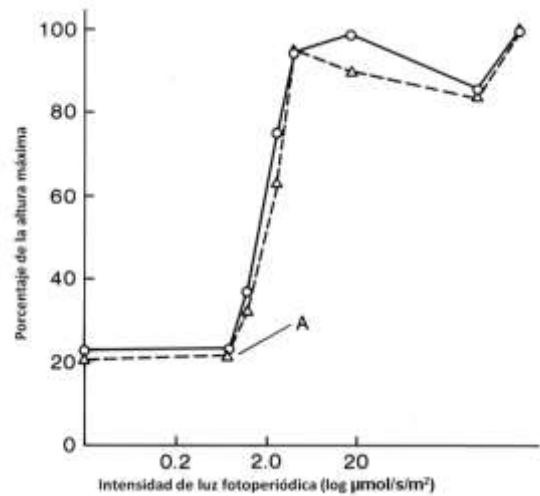


Figura 3.3.14 Los cultivos que son sensibles al fotoperíodo, como estos dos ecotipos de *Picea glauca*, tienen un mínimo crítico de intensidad de luz (A) que debe ser satisfecho; para muchas especies, una respuesta total puede ser obtenida a niveles de luz tan bajos como 8 μmol/s/m² (~430 lux) (modificado de Tinus, 1976).

Los tratamientos de día corto pueden ser usados para varios propósitos (van Steenis, 1991):

- Inducir el desarrollo de yemas en especies como *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg., *Picea sitchensis* (Hong.) Carr., *Thuja plicata* Donn ex D. Don, y ecotipos como los de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, de bajas elevaciones y climas costeros.

- Forzar un desarrollo prematuro de yemas, en cultivos de estación temprana, que deben ser embarcados o plantados durante el verano.

La técnica de día corto ha probado ser especialmente valiosa a elevadas latitudes, donde la terminación del alumbrado fotoperiódico o de otros tratamientos para originar tensión puede no ser suficiente para facilitar el desarrollo de la yema terminal, e iniciar la tase de endurecimiento. En Canadá, el apagado de las luces fotoperiódicas no es particularmente efectivo, a causa de los largos días naturales. Más aún, la tensión hídrica, que también es usada para detener el crecimiento

de la parte aérea de la planta, reduce significativamente la biomasa de ésta, y afecta adversamente el tamaño de la yema terminal (O'Reilly *et al.*, 1989; Grossnickle *et al.*, 1991).

La técnica de día corto normalmente no es requerida en viveros enclavados a bajas latitudes; el encendido de las luces es normalmente suficiente. Las plantas que han sido cultivadas bajo alumbrado fotoperiódico responden con rapidez a los cambios en el fotoperiodo. Durante la fase de rápido crecimiento, los viveristas pueden generar una condición "relativa" de día corto, una vez que el crecimiento en altura alcanza entre el 85 al 90% del objetivo.

Cuadro 3.3.5 Respuesta de varias especies a tratamientos de alumbrado fotoperiódico.

Especie y fuente de la semilla	Respuesta en crecimiento*		Alumbrado fotoperiódico				Fuente
			Intensidad		Duración	Tipo	
	Altura	Peso	$\mu\text{mol/s/m}^2$	lux			
<i>Abies amabilis</i> (Columbia Británica)	1.9	1.5	C	HPS	2.2	220	Arnott (1979)
<i>Celtis</i> spp. + (Bismark, ND)	1.2	1.8	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juglans nigra</i> + (Manhattan, KS)	1.1	1.1	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juniperus scopolorum</i> (Towner, ND)	1.6	2.3	I	INC	16	860	Tinus y McDonald (1979)
<i>Juniperus virginiana</i> (Towner, ND)	1.9	2.4	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Sur de la CB)	5.0	6.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Sur de la CB)	1.7	1.7	C	HPS	1.0	100	Arnott y Macey (1985)
<i>Picea glauca</i> (Alberta central)	4.5	>10	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea glauca</i> (CB central)	2.3	2.0	C	HPS	8.6	800	Arnott y Macey (1985)
<i>Picea engelmannii</i> (Fort Collins, CO)	1.4	7.7	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea engelmannii</i> (Indian Head, SK)	1.4	7.7	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Picea glauca x Picea engelmannii</i> (CB central)	4.0	5.5	I	INC	8	400	Arnott (1982)
<i>Pinus contorta</i> (Alberta central)	2.3	2.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Ruidoso, NM)	1.5	1.8	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Valentine, NE)	3.1	3.6	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Pinus ponderosa</i> (Colorado Springs, CO)	1.5	2.3	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Quercus macrocarpa</i> + (Devils Lake, ND)	1.2	1.2	I	INC	8	430	Tinus y McDonald (1979)
<i>Tsuga heterophylla</i> (Costa de Óregon)	1.7	1.6	I	INC	8	430	Owston y Kozlowski (1978)
<i>Tsuga mertesiana</i> (Columbia Británica)	2.3	1.7	C	HPS	4.0	400	Arnott y Macey (1985)

I: Alumbrado intermitente; C: Alumbrado continuo; HPS: Lámpara de sodio de alta presión; INC: Lámpara incandescente.

* La respuesta iguala el crecimiento bajo el tratamiento de luz recomendado, dividido entre el crecimiento sin luz por la noche.

+ *Celtis* spp. se mantiene creciendo sin extender su fotoperiodo, pero de cualquier manera, éste debería de ser utilizado. *Juglans nigra* responde a largos fotoperiodos solamente con elevada concentración de CO₂, *Quercus macrocarpa* requiere días muy cálidos y noches cálidas para mantener el crecimiento, y el efecto del alumbrado fotoperiódico bajo tales condiciones, es incierto.

ND: Dakota del Norte; KS: Kansas; CB: Columbia Británica (Canadá); CO: Colorado; SK: Saskatchewan (Canadá); NM: Nuevo México; NE: Nebraska.

No obstante, los tratamientos de día corto constituyen una tecnología relativamente nueva en los viveros forestales, y tiene peligros potenciales. Por ejemplo, en algunos viveros tienen problemas para mantener una yema firme una vez que los tratamientos de día corto han terminado (Fig. 3.3.16A). Esto puede ser causado por no aplicar el tratamiento de día corto durante un periodo adecuado de tiempo, o por temperaturas inusualmente cálidas que interfieran con el proceso de dormancia (Odlum, 1991).



Figura 3.3.15 En elevadas latitudes, algunos viveristas utilizan cortinas de oscurecimiento para crear condiciones de día corto durante los largos días de verano. Después de algunas semanas de tratamientos de día corto, las plantas detienen el crecimiento de la parte aérea y desarrollan una yema terminal.

No todas las especies pueden responder favorablemente a estos tratamientos. Investigaciones recientes con *Thuja plicata* Donn ex D. Don han mostrado que los tratamientos día corto deben ser aplicados muy temprano en la estación, para resultar prácticos y pueden resultar detrimentales para el crecimiento radical (Krasoski y Owens, 1991). Los efectos fenológicos de los tratamientos de día corto pueden persistir por al menos 1 año después de la plantación. Las plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. que recibieron tratamientos de día corto, tuvieron un mayor crecimiento en altura que los testigos, durante la primera estación de crecimiento, dado que rompieron su yema más temprano y desarrollaron yemas posteriormente (Oldum y Colombo, 1988). Esta ventaja potencial puede ser una desventaja porque muchas de estas plantas sufrieron daño por frío durante las heladas primaverales. Sin embargo, al término de la

primera estación de cultivo, las plántulas de día corto habían desarrollado nuevos brotes líderes y estaban más altas que las plantas bajo el tratamiento de día natural (Odlum, 1991; Fig. 3.3.16C). Obviamente, se requiere de más investigación sobre los efectos de los tratamientos de día corto y de día largo de esta tecnología (Ver sección 3.3.4.6 para mayor información sobre los tratamientos de día corto).

Fototropismo. Aunque no necesariamente es tan importante culturalmente como la fotosíntesis o el fotoperiodismo, el fototropismo tiene que ver con respuestas morfológicas a diferentes calidades en la luz. Evidencia reciente indica que estas respuestas fototrópicas pueden estar controladas por una respuesta del fitocromo a la razón entre luz roja y luz roja lejana (Smith y Whitelam, 1990). En invernaderos cerrados, algunas especies exhiben una elongación indeseable de la parte aérea (estiramiento) cuando son cultivadas bajo sombra excesiva. Los viveristas de la costa oeste han observado que las plantas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco se hacen más altas y un poco espiraladas cuando algunas estructuras o equipo del invernadero producen sombras permanentes en el área de cultivo, o cuando la cubierta es vieja o está sucia.

El crecimiento de la parte aérea de muchas especies se orienta en forma natural hacia el sol, o hacia otra fuente predominante de luz, y este tropismo puede ser excesivo en viveros enclavados a grandes latitudes, en el otoño y en el invierno (Fig. 3.3.17).



A



B



C

Figura 3.3.16 Si los tratamientos de día corto son aplicados inadecuadamente, algunas especies o ecotipos pueden romper yemas y desarrollar brotes muy largos, una vez que los tratamientos cesan (A; B, derecha). Los efectos de tratamientos de día corto pueden perdurar hasta la siguiente primavera, cuando las plántulas tratadas (C, derecha) se desarrollan más temprano que el testigo (C, izquierda) (Cortesía de K. Odium).

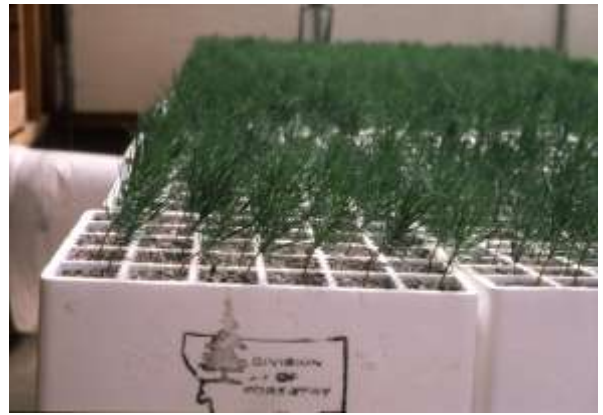


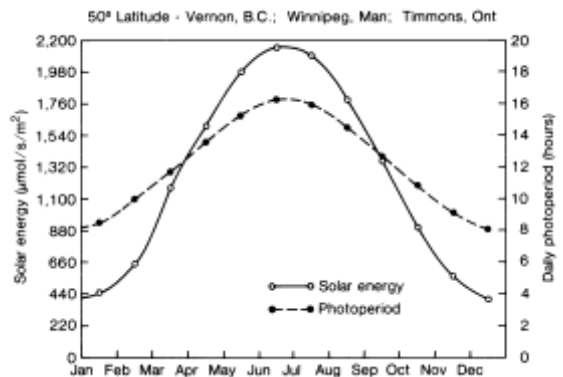
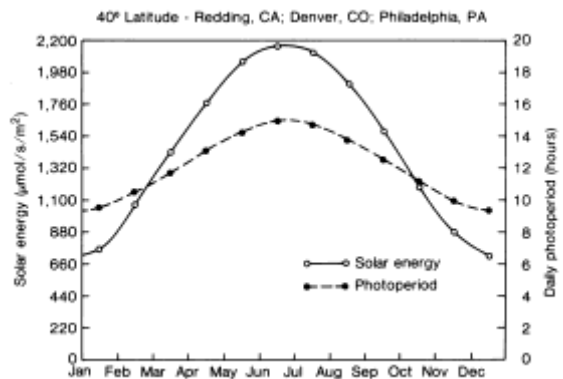
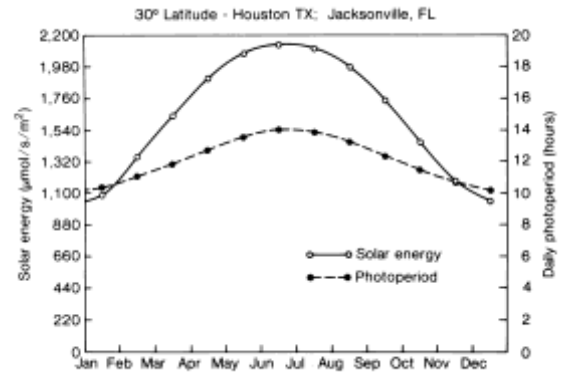
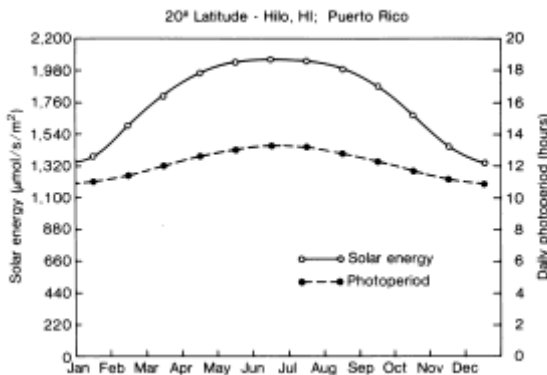
Figura 3.3.17 Las plantas cultivadas durante fines del otoño o principios de la primavera, en viveros ubicados a grandes latitudes, a veces exhiben fototropismo, una respuesta direccional hacia el sol, el cual se encuentra bajo, sobre el horizonte.

3.3.3 Niveles Óptimos de Luz

La luz afecta todas las fases del cultivo de las plantas, y el desarrollo, desde la germinación de la semilla, pasando por el crecimiento acelerado que tipifica a las plantas que son cultivadas en contenedores, hasta el desarrollo de yemas y el endurecimiento, y dicha influencia es particularmente significativa en el ambiente de los viveros que producen en contenedores. La intensidad y la duración de la luz solar disponible, también deberían ser consideradas durante el establecimiento de un vivero, pues tanto la programación del cultivo como el número de cultivos que pueden ser obtenidos cada año, serán afectados.

3.3.3.1 Programación del Cultivo

No únicamente cambia la longitud del día con las estaciones en las grandes latitudes, también cambia la intensidad de la radiación solar. En efecto, a grandes latitudes la variación estacional de la intensidad solar es casi tan extrema como la del fotoperiodo (Fig. 3.3.18). Este cambio estacional en intensidad solar, afecta la programación de la cosecha. En los viveros enclavados en los trópicos, rutinariamente siembran sus cultivos sin importar la época del año. No obstante, el potencial para obtener cosechas múltiples decrece a grandes latitudes.



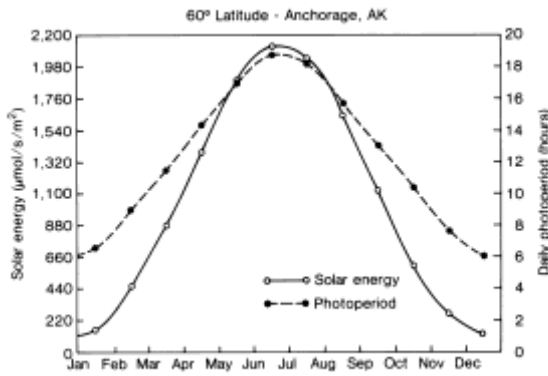


Figura 3.3.18 La variación estacional en la intensidad de la radiación solar, así como la longitud del día, aumenta con la latitud. Aunque no tan aparente como la variación en la longitud del día, la variación en la intensidad solar es muy importante para el cultivo de especies forestales en viveros que producen en contenedores.

En las zonas templadas, los administradores de viveros que desarrollan un cultivo por año deberían programar alrededor del solsticio de verano (junio 21 en el hemisferio norte), para que haya suficiente luz solar para el cultivo de las plantas a través del ciclo de producción (Fig. 3.3.19). Los cultivos múltiples también deberían ser programados alrededor del solsticio. Para los viveros en los que se producen dos cultivos por año, la primera producción debería ser sembrada lo suficientemente temprano para que pueda ser removida del invernadero oportunamente, y el segundo cultivo debería ser sembrado en el solsticio (Fig. 3.3.19). Los cultivos sembrados después en el año tienen una progresiva menor disponibilidad de luz solar para la fotosíntesis, y esto es aún más significativo en los climas muy nublados (Fig. 3.3.4). La reducción de la intensidad solar se refleja en las menores tasas de crecimiento durante el otoño y el invierno (Downs, 1985), y también afecta a otros factores de la producción en el vivero, como la incidencia de enfermedades como el "moho gris" (*Botrytis cinerea*) (Taller y Peterson, 1988). Así que, a menos que las demandas de producción requieran de un segundo cultivo, es más económico obtener un cultivo de "verano" en los viveros de zonas templadas. (La programación del cultivo será discutida en el volumen seis de esta serie).

3.3.3.2 Fase de establecimiento

La germinación de muchas de las semillas de especies forestales no depende de los niveles de intensidad de luz, aunque la calidad de la luz y el fotoperíodo pueden afectar significativamente a algunas especies. Por ejemplo, la luz roja (660 nm) promueve la germinación de la semilla de *Pinus taeda* L., mientras que la roja-lejana (730 nm) la inhibe (McLemore, 1971). Tanto la tasa de germinación como la germinación total son promovidas por longitudes del día de 8 a 12 horas, para muchas especies (Kramer y Kozlowski, 1979). Sin embargo, pueden ocurrir algunas excepciones, como las semillas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, que germinan mejor con un fotoperíodo de 16 horas, en comparación con uno de 8 horas (Jones, 1961).

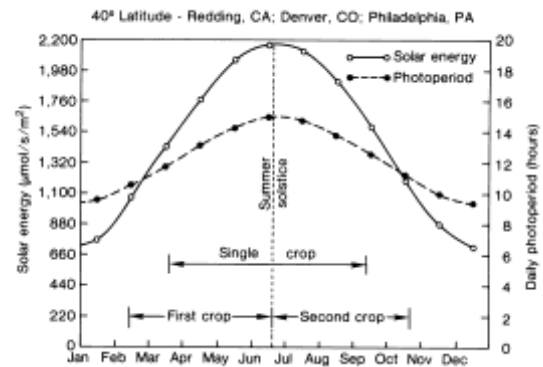


Figura 3.3.19 A causa de que el alumbrado fotosintético suplementario no es nada económico, los viveristas deberían planear sus cosechas alrededor del solsticio de verano, para tomar ventaja de las mayores intensidades de luz. En la zona templada, algunos viveros son capaces de producir dos o aún tres cultivos por año, gracias a una cuidadosa planeación.

Los cotiledones de las plantas de coníferas en germinación, se hacen fotosintéticamente activos tan pronto como emergen del medio de cultivo, y el desarrollo de las acículas primarias depende de los fotosintatos de los cotiledones. La mayoría de las plántulas recién germinadas crecen mejor con intensidades moderadas de luz, alrededor de 55 μmol/s/m² (~3,000 lux), y puede ser necesaria alguna reducción en la intensidad de la luz para alcanzar un óptimo de germinación en ambientes con elevados niveles de energía solar. Se podría obtener la intensidad de luz

deseada con varios tipos de cubiertas, como mallas al 50% en los invernaderos. Una cubierta menos densa (30 a 50%) puede ser necesaria en los climas nublados. Sin embargo, la intensidad de luz apropiada varía con las especies; así, en plantas de *Pinus resinosa* Ait. el desarrollo de las acículas primarias fue retardado severamente cuando los niveles de luz se redujeron por debajo de los 120 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~6,500 lux) (Kozlowski y Borger, 1971). En los viveros que producen pinos del sur de los E.U.A., cualquier sombra es indeseable, pero la malla es utilizada como protección ante lluvias intensas.

Las plántulas emergen durante la germinación a un ambiente con elevados niveles de energía solar, que las somete a tensión. Las condiciones de luz, temperatura, y humedad, son críticas en este momento, y los viveristas deben vigilar con esmero, para asegurar que todos los factores ambientales estén proporcionados a niveles óptimos. El tipo de sustrato puede también afectar la luz y la temperatura en el microambiente alrededor de la semilla en germinación. La perlita o la arena, de colores claros, reflejan una considerable cantidad de radiación solar. Por otro lado, los “mulches” oscuros absorben radiación solar, y pueden desarrollar temperaturas que originen daños en el tallo suculento (El daño por calor en los viveros forestales se discute con más detalle en el volumen cinco de esta serie).

3.3.3.3 Fase de crecimiento rápido

Después que las plántulas producidas en contenedores se han establecido, la intensidad de la luz debería ser aumentada gradualmente, hasta alcanzar el punto de saturación, a efecto de maximizar la fotosíntesis. Si las plantas estuvieron bajo sombra durante la fase de establecimiento, entonces la cubierta debería ser removida, a menos que las temperaturas diurnas resultaran dañinas sin tal cubierta. Este es con frecuencia el caso en los trópicos o en climas áridos, durante el verano.

El punto de saturación por luz varía entre las especies (Cuadro 3.3.4), por lo que al producir especies con distintos requerimientos de luz, lo mejor es tenerlas en ambientes de cultivo

separados. Si no se cuenta con espacios separados, los viveristas deben diseñar un ambiente de luz que sea adecuado para la mayor parte de las especies en producción. Una opción es el sombreado de alguna sección de una estructura de cultivo para especies tolerantes a la sombra. Resulta más práctico que los invernaderos estén orientados perpendicularmente con respecto al arco solar (esto es, de norte a sur), pero aún así, el área sombreada cambiará gradualmente durante la estación de cultivo.

Idealmente, el sombreado debería ser ajustado a través del día y de un día a otro para optimizar la intensidad de la luz, pero si el sombreado solamente puede ser aplicado y removido manualmente, esto resultaría impráctico. En la actualidad existen sistemas motorizados de sombreado que sí pueden lograr este resultado (Vollebregt, 1990) (ver sección 3.3.4.6).

Dado que la intensidad de la luz es reducida con cualquier tipo de cubierta, algunos viveristas mueven sus cultivos fuera de los invernaderos totalmente cerrados tan pronto como las plantas están establecidas en los contenedores (Fig. 3.3.20A). Desde luego, esto es sólo una opción cuando las temperaturas ambientales son moderadas. Brissette *et al.* (1990) reportaron que aún el 30% de sombra redujo seriamente el crecimiento de plántulas de *Pinus palustris* Mill., y recomiendan el cultivo de éstas en complejos abiertos, a plena luz del sol, durante los meses de verano. Aún tan al norte como en la Columbia Británica, Canadá, los administradores de viveros están removiendo las cubiertas de polietileno de sus invernaderos a mediados del verano, para maximizar la intensidad de la luz (Fig. 3.3.20B). Esta práctica ha demostrado promover la calidad de la planta (Taller y Peterson, 1988) (ver la sección 3.3.4.1 para mayor información).



A



B

Figura 3.3.20 Puesto que cualquier tipo de cubierta de invernadero reduce la intensidad de la luz, en algunos viveros se cultivan las plantas en complejos abiertos, equipados con alumbrado fotosintético (A). Otros viveristas remueven la cubierta tan pronto como las temperaturas del exterior se hacen favorables para el cultivo (B).

La eficiencia fotosintética también varía con el tipo de follaje. Por ejemplo, las acículas primarias de *Pinus taeda* L. alcanzan su máxima fotosíntesis a menores intensidades de luz, en comparación con las acículas secundarias maduras de plantas más viejas (Bormann, 1956). Cuando las plantas comienzan a traslapar su follaje entre sí, se produce un sombreado mutuo que abate la tasa fotosintética: esto puede ocurrir relativamente pronto en la estación de cultivo con especies de hojas largas, o con plántulas cultivadas a grandes densidades. Los árboles grandes desarrollan hojas de sol y de sombra como respuesta a la intensidad de la luz (Kramer y Kozlowski, 1979). Las plantas de las especies tolerantes a la sombra, o cualquiera de las plantas que hayan sido cultivadas bajo sombra, pueden desarrollar follaje no tolerante a elevadas intensidades luminosas. Estas plántulas pueden resultar "quemadas

por el sol" si son expuestas a luz solar plena (ver sección 3.3.2.1).

Muchos viveros mantienen sus plántulas bajo fotoperiodos extendidos durante toda la fase de crecimiento rápido, para promover el crecimiento de la parte aérea y no propiciar el desarrollo de yemas terminales. Aún una interrupción breve durante este periodo puede resultar en el desarrollo de yemas, y tener serias repercusiones económicas (Fig. 3.3.12D). Cuando las plantas alcanzan aproximadamente el 80 a 90% de su altura objetivo, los viveristas quitan las luces fotoperiódicas para iniciar la fase de endurecimiento.

3.3.3.4 Fase de endurecimiento

El objetivo de la fase de endurecimiento es finalizar el crecimiento en altura, producir yemas, y estimular el crecimiento en diámetro y el de la raíz, mientras gradualmente se endurece a la planta para tolerar tensión. El control del fotoperiodo es el estímulo predominante que causa el cese de crecimiento en altura en las plantas, y el desarrollo de la yema terminal. La mayoría de las especies forestales son muy sensibles a los cambios en la longitud del día, aunque las especies y ecotipos de latitudes del sur y de ambientes costeros suaves, resultan menos afectadas (ver sección 3.3.2.2). En los Estados Unidos, la mayoría de los administradores de viveros que producen en contenedores, eliminan las luces fotoperiódicas para iniciar el desarrollo de yemas y para inducir la dormancia. A causa de los largos días de verano, algunos viveristas canadienses utilizan cortinas oscuras para acortar el fotoperiodo (Esta técnica es discutida en la sección 3.3.4.6, y otras técnicas culturales para inducir la dormancia son discutidas a detalle en el volumen seis de esta serie).

Muchos viveros que producen en contenedores comienzan la fase de endurecimiento con la remoción de las plantas del invernadero y exponiéndolas a condiciones ambientales; otros viveros simplemente quitan la cubierta del invernadero. Sin embargo, los viveristas deberían ser cautelosos cuando movilizan especies

tolerantes a la sombra desde un área de cultivo sombreada hacia otra con luz solar plena, pues las plantas pueden resultar "quemadas por el sol" (Fig. 3.3.9). Los viveristas pueden prevenir el foto-daño, minimizando la tensión a la planta, y a través de una gradual aclimatación a la elevada intensidad luminosa. El follaje suculento adquiere endurecimiento conforme madura, desarrollando una cutícula más gruesa, y mediante otros cambios morfológicos en la epidermis (Levitt. 1980). Las especies susceptibles deberían ser movidas gradualmente de la sombra total; primero hacia un área con intensidad de luz intermedia durante varias semanas, para finalmente exponerlas a luz solar plena.

3.3.4 Modificando la Luz en los Viveros Forestales que Producen en Contenedores

La luz es una de las herramientas de cultivo más importantes que tiene a su disposición el administrador de viveros que producen en contenedores, quien puede modificar la intensidad de la luz solar o complementar ésta con luces artificiales. La localización y orientación de la estructura de cultivo es también importante, porque las sombras permanentes pueden causar abatimiento de las tasas de crecimiento de las plántulas (Fig. 3.3.21) (La localización de los viveros se discute con mayor detalle en el volumen uno de esta serie).

3.3.4.1 Efecto de las cubiertas estructurales

La radiación solar es modificada tanto en intensidad como en calidad, al momento en que ésta entra en la atmósfera terrestre. El tipo de invernadero y su localización también afectan la naturaleza de la luz solar incidente. Sin considerar las reducciones debidas al ángulo solar y a la cubierta estacional de nubes, la radiación solar medida dentro de un invernadero (Fig.3.3.22), aún continúa aproximadamente con el modelo de distribución normal para la energía solar a través de la estación de crecimiento (Fig. 3.3.19).

El grado de la modificación solar varía con las características de la estructura de cultivo, y con el tipo, edad y limpieza de la cubierta (Hanan *et al.*, 1978). La radiación solar en las longitudes de onda de la RFA, fue medida dentro de dos invernaderos en la Columbia Británica, Canadá, uno construido con paneles de fibra de vidrio, y otro con película de polietileno. La cubierta de polietileno transmitió todo el espectro medido mejor que la cubierta de fibra de vidrio (Fig. 3.3.23), y la diferencia promedio en todas las longitudes de onda de la RFA fue de 12.2% (Taller y Peterson, 1988). Los dos tipos de cubiertas reflejaron más de las longitudes de onda más cortas, produciendo así un ambiente de luz relativamente alto, en las bandas roja e infrarroja.



Figura 3.3.21 Los viveros que producen en contenedores deberían estar enclavados lejos de árboles o de otras obstrucciones, que pueden bloquear la luz solar durante cualquier parte apreciable del día o de la estación de cultivo. Los manchones de sombra permanente reducirán la fotosíntesis y pueden originar que las plantas crezcan altas y con forma espiralada.

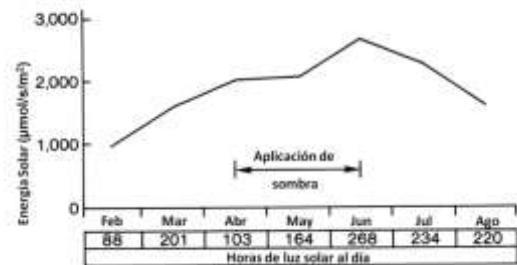


Figura 3.3.22 La cantidad de radiación solar disponible para los cultivos en invernadero, está afectada por la localización, tipo de estructura, y prácticas de cultivo. La luz solar mensual promedio dentro de este invernadero de vidrio en Quebec, Canadá, siguió el modelo anual normal (Fig. 3.3.19), excepto cuando se empleó malla para dar sombra a efecto de reducir las temperaturas en el invernadero, durante la parte temprana de la estación de crecimiento (Modificado de González y D'Aoust, 1988).

McMahon *et al.* (1990), en una investigación detallada de la transmitancia espectral de varias cubiertas de invernadero y materiales de sombreado, encontraron una variación considerable entre los productos (Cuadro 3.3.6). Tanto la intensidad como la calidad de la luz variaron, no sólo entre diferentes cubiertas estructurales o de sombreado, también entre productos similares, como las marcas de películas de polietileno. La transmisión total de luz osciló de 95 a 52% para los materiales estructurales, y de 45 a 21% para los materiales de sombreado. Aunque básicamente las longitudes de onda azul y roja no resultan afectadas por los materiales estructurales, sí lo son por los

materiales de sombreado. Tanto la luz azul como la razón entre luz roja y roja lejana, pueden afectar la morfología de la planta. La luz con una elevada proporción de radiación roja lejana a roja, tiende a producir hojas más largas, y entrenudos largos ("estiramiento") (McMahon *et al.*, 1990).

La condición y limpieza de la cubierta del invernadero, puede tener un profundo efecto en la transmisión de la luz (Fig.3.3.24); Nelson (1985) estima que solamente la acumulación de polvo en la cubierta de un invernadero, puede reducir la transmisión de la luz en un 20%. Las cubiertas de plástico duro o de fibra de vidrio, deberían ser limpiadas regularmente, y aún las de polietileno pueden ser limpiadas con el uso de mangueras. La limpieza o el reemplazamiento de la cubierta afectarán no sólo la intensidad de la luz solar, también el régimen de temperaturas dentro de la estructura, y por tanto, las prácticas de cultivo deben ser ajustadas en correspondencia con estos cambios.

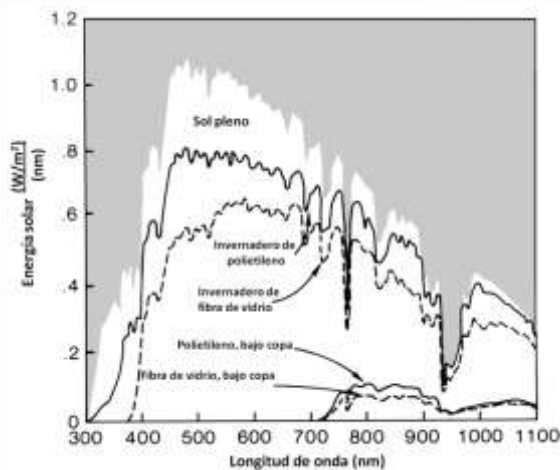


Figura 3.3.23 La distribución espectral de la radiación solar fue proporcionalmente menor en un invernadero de fibra de vidrio, en comparación con uno cubierto con polietileno. La luz solar que fue transmitida a través de las copas de las plantas resultó severamente modificada tanto en intensidad como en calidad (Adaptada de Tuller y Peterson, 1988).



Figura 3.3.24 Algunos tipos de cubiertas de invernadero necesitan ser periódicamente limpiadas o reemplazadas. Esta vieja cubierta de fibra de vidrio se ha tornado amarilla y está cubierta con detritos de una cortina rompe vientos adyacente.

La estación es también un factor, pues la transmisión de la luz a través de las cubiertas de los invernaderos varía con el ángulo del sol. Grazoli (1988) midió la transmisión de la radiación solar a través de una variedad de cubiertas de invernadero, con el sol directamente sobre de ellas y también con un ángulo de 60°, el cual es el máximo ángulo solar a 37° de latitud en el solsticio de invierno, en el hemisferio norte. Bajo estas condiciones simuladas de invierno, la transmisión de la luz decreció entre 8.0 a 14.6% para las cubiertas comunes de invernadero (Las propiedades de las cubiertas de invernadero, son discutidas con más detalle en el volumen uno de esta serie).

3.3.4.2 Sombreado el área de cultivo

El calor se hace un mayor problema durante los meses de verano, y muchos viveristas modifican las características de transmisión de la luz en sus invernaderos mediante la aplicación de materiales o pinturas blancas reflectoras de luz, o instalando telas para sombreado (Fig. 3.1.21). El blanqueado y la tela de sombra son consideradas como sombreadoras "permanentes" porque son dejadas en el sitio durante la mayor parte de la estación de cultivo. La tela de sombreado es preferible al blanqueado, porque esta puede ser removida estacionalmente sin dejar residuos. Las telas de sombreado comerciales pueden producir una sombra de 20 a 90%, y también están disponibles en diferentes colores. La transmisión de la RFA total y de longitudes de onda específicas está afectada por el tipo de material de sombreado (Cuadro 3.3.6), y el filtrado selectivo de algunas telas de sombreado afectará el crecimiento de la planta (McMahon *et al.*, 1990).

La selección adecuada del sombreado es un proceso de mediación, porque la intensidad de la luz cambia durante el día con el ángulo del sol y con el grado de nubosidad. Debido a la labor involucrada, no resulta económico ajustar la tela de sombra manualmente para mantener las condiciones de luz. Sin embargo, con el advenimiento de sistemas de sombreado retráctiles, los viveristas tienen la opción de ajustar la intensidad de la luz dentro del área de cultivo para maximizar la fotosíntesis o para reducir la temperatura varias veces al día (Fig. 3.3.25).

Aunque los sistemas automáticos de sombreado son relativamente caros de instalar, pueden aumentar grandemente la cantidad de luz solar que alcanza al cultivo, y por tanto, afectar las tasas de crecimiento de las plantas. En una prueba operativa de invernadero, un sistema automatizado de sombreado permitió que el cultivo recibiera un 50% más de horas de RFA, en comparación con otro cultivo en un invernadero con sombra permanente (Vollebregt, 1990).

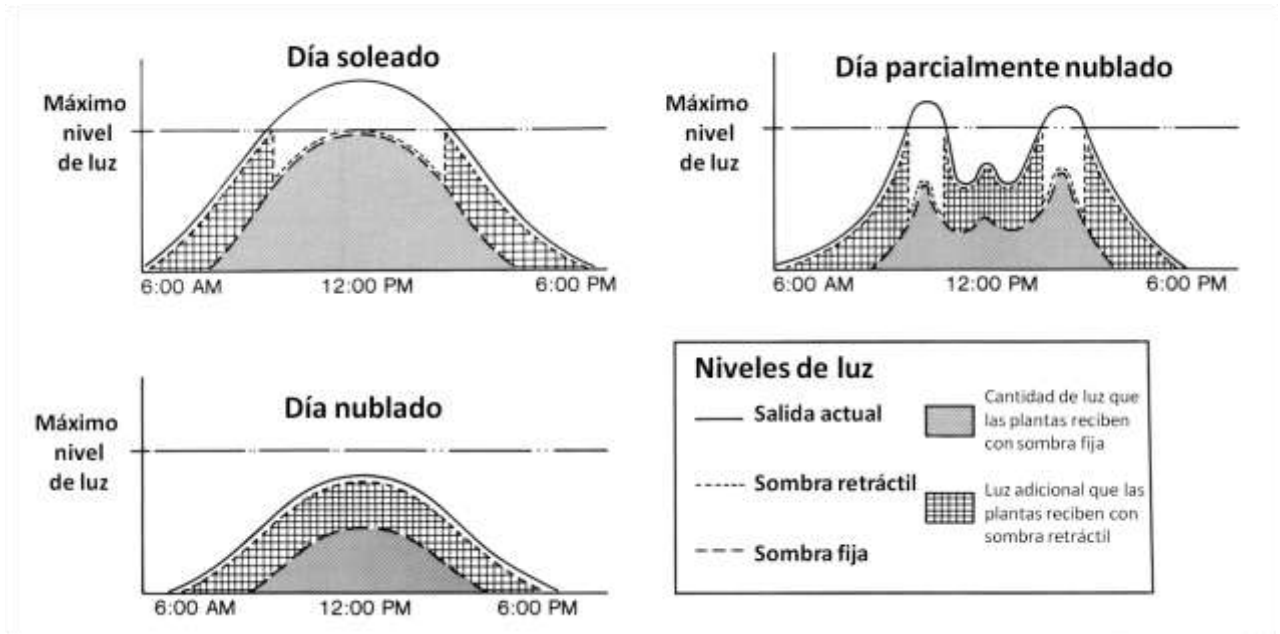


Figura 3.3.25 Los sistemas retráctiles de sombra permiten a las plantas recibir más luz solar que las telas de sombreado "fijas". La cantidad de luz adicional puede ser significativa temprano en la mañana, y tarde durante el día, y a través del día bajo condiciones de nublado parcial (Modificado de Vollebregt, 1990).

Cuadro 3.3.6 Transmitancia espectral de cubiertas de invernadero y de materiales de sombreado.

Material cobertor	Luz fotosintética en 400 – 700 nm (% del sol pleno)	Luz fotomorfogénica	
		Azul en 400 – 500 nm (% de sol pleno)	Razón luz roja lejana a roja en 730-660 nm
Materiales estructurales			
Vidrio	93	93	0.97
Película de polietileno			
Monsanto 602®	88	83	1.01
Monsanto 703®	67	63	1.04
Monsanto Cloud-9®	52	48	1.04
Panel acrílico Exolite®	95	92	1.02
Panel de policarbonato Lexan®	78	75	1.04
Materiales de sombreado			
Pintura de látex blanca	41	39	0.99
Tela negra para sombreado (55% de sombra)	45	44	1.00
Tela verde para sombreado "Saran" (63% de sombra)	35	34	1.04
Tela de poliéster verde para sombreado	21	27	5.58
Tela de poliéster aluminizado para sombreado (80% de sombra)	21	18	1.06

Fuente: modificado de McMahon *et al.* 1990

3.3.4.3 Tipos de lámparas

Los dos factores biológicos más importantes a considerar durante la selección de un sistema de alumbrado hortícola, son la intensidad y la calidad de la luz, conocidos en conjunto como **distribución de energía espectral**, porque éstos determinarán la medida en que el sistema será efectivo. Una vez que estos dos criterios han sido contemplados, entonces han de considerarse otros aspectos operativos: eficiencia de la energía, uniformidad en la distribución de la luz, costo inicial de las lámparas y de la instalación, vida media de las lámparas, costo de reemplazo de éstas, y resistencia a la corrosión. Para aplicaciones hortícolas, el alumbrado artificial puede ser dividido en incandescente, fluorescente y en alumbrado de descarga de alta intensidad:

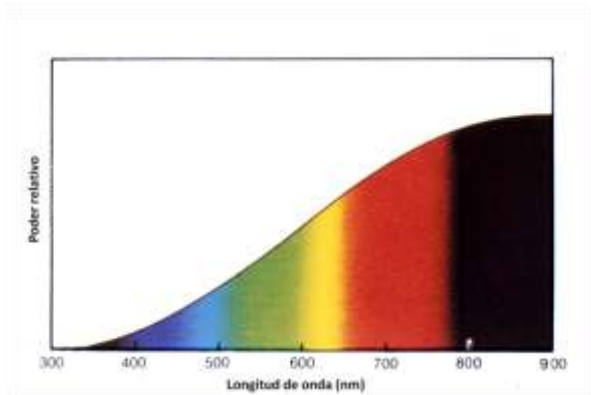
Lámparas incandescentes. Una lámpara incandescente estándar, contiene un filamento de tungsteno encerrado en un bulbo de vidrio, que está lleno con gas nitrógeno, para prevenir la oxidación y la evaporación del tungsteno a elevadas temperaturas (Bickford y Dunn, 1972). Una lámpara incandescente típica produce radiación que alcanza la banda infrarroja (Fig. 3.3.26A), y por tanto genera una cantidad de calor relativamente alta.

Las luces incandescentes no son recomendables como alumbrado fotosintético, ya que generan

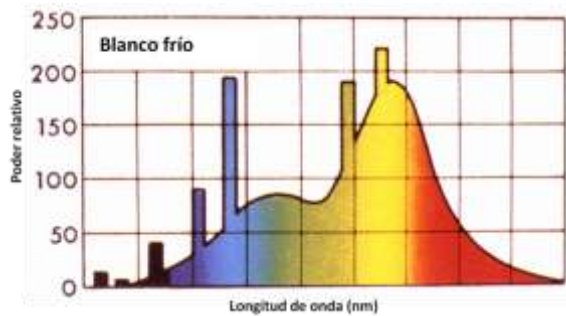
mucho calor y son muy caras de operar a las intensidades requeridas. Estas pueden ser balanceadas con luces fluorescentes, para cubrir mejor las longitudes de onda de la RFA, pero esta combinación es solamente usada en las cámaras de cultivo. Sin embargo, las lámparas incandescentes son el tipo de alumbrado fotosintético más ampliamente utilizado en los viveros de los E.U.A. y del Canadá (Cuadro 3.3.7), pues proporcionan una energía espectral utilizable, son baratas de instalar, y pueden ser apagadas frecuentemente sin pérdida de la vida del bulbo. Las lámparas incandescentes gradualmente depositan tungsteno en el interior del bulbo (un proceso denominado "oscurecimiento"), el cual disminuye la salida de luz y su vida de servicio útil (Aldrich y Bartok, 1989). Los bulbos incandescentes estándar son los menos eficientes y tienen la menor vida promedio de todas las fuentes comunes de luz empleadas como alumbrado hortícola (Cuadro 3.3.8), lo cual significa que los bulbos deben de ser reemplazados con frecuencia.

Una amplia variedad de lámparas incandescentes estándares y especiales, están disponibles para muchas aplicaciones (Kaufman y Christensen, 1984). El bulbo incandescente estándar requiere de un reflector externo para dirigir la luz hacia abajo y proporcionar una distribución más uniforme (Fig. 3.3.27A); no obstante, los reflectores externos

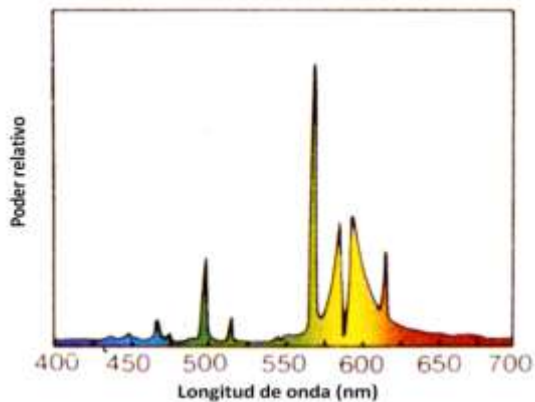
producen sombras, y pueden facilitar la acumulación de humedad. Este problema puede ser evitado con lámparas incandescentes especializadas, que tienen reflectores internos para concentrar la luz y enfocarla (Fig. 3.3.27B-D). Estas lámparas de flujo dirigen todas las longitudes de onda sobre el cultivo. Tanto los reflectores estándar, como los de halógeno-tungsteno pueden ser modificados con una cubierta externa transparente, ligeramente iridiscente, que refleja menos de las longitudes de onda infrarrojas (Fig. 3.3.28). Esto algunas veces representa una ventaja, pues se aumenta la razón de luz roja a roja lejana, y se hace a estas lámparas más eficientes para el alumbrado fotoperiódico.



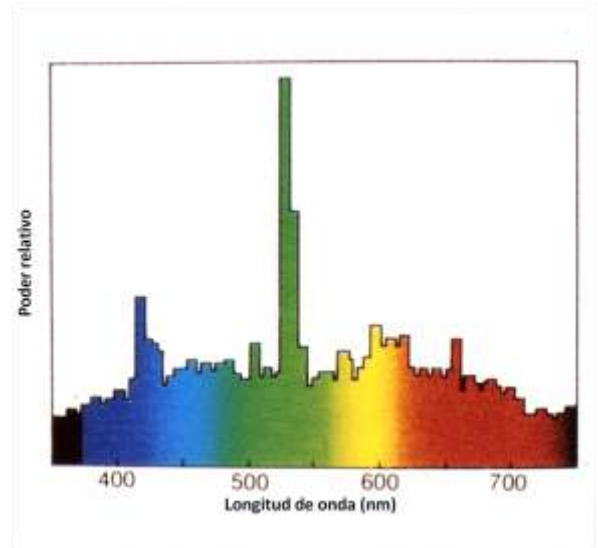
A



B



C



D

Figura 3.3.26 Las curvas de distribución de energía espectral (DEE) varían significativamente en torno a diferentes tipos de alumbrado artificial. Las lámparas incandescentes, incluyendo los tipos halógeno-tungsteno, producen la mayor parte de su luz en las longitudes de onda correspondientes al rojo y al rojo lejano (A). Existen varios tipos de lámparas fluorescentes, pero su DEE tiene una salida más balanceada (B). Las lámparas de sodio de alta presión (C) producen la mayor parte de su luz en las longitudes de onda amarillas, lo que las hace adecuadas para el alumbrado fotosintético. Las curvas de la DEE de lámparas de halógeno metal varían con el tipo de metal usado y producen una luz "blanca" balanceada (D) (Reimpreso de Kauffman y Christensen, 1984: IES lighting handbook, 1984, volumen de referencia, pp. 8-21 y 8-22, con permiso de la "Illumination Engineering Society of North America", New York).

Cuadro 3.3.7 Propósito del alumbrado artificial y tipos de lámparas usadas en los viveros forestales que producen en contenedores en los Estados Unidos y Canadá.

Tipo de lámpara	Intensidad de luz*		Uso (%)	
	$\mu\text{mol/s/m}^2$	lx	Por clase	Total
Alumbrado fotosintético				5
Sodio de alta presión	17.8-77.4	1,500-6,500	80	
Fluorescente	88.6	7,000	20	
Sin lámparas				95
Alumbrado fotoperiódico				82
Incandescente				
Estándar	4.1-10.2	200-500		
Halógeno-Tungsteno	2.0	100		
Fluorescente	1.3-6.3	100-500		
Descarga de alta intensidad				
Halógeno metal	5.7	400		
Sodio a alta presión	1.2-77.4	100-6,500		
Sodio a baja presión	3.7	400		
Sin lámparas				18

* en 39% de las respuestas no hubo seguridad sobre la intensidad de la luz a nivel del cultivo, o solamente conocían las especificaciones de las lámparas

+ Los valores son mayores porque estas luces son también empleadas como alumbrado fotosintético

Fuente: Container Nursery Surveys (1984; 1990).

Cuadro 3.3.8 Comparación de varias fuentes de luz usadas como alumbrado hortícola.

Tipo de lámpara	Poder eléctrico (watts)		Iluminación (lumens)	Eficiencia (lumens/watt)	Vida promedio (h)
	Lámpara	Total*			
Incandescente					
Estándar	100	100	1,680	17	750
	200	200	4,000	20	750
Halógeno - Tungsteno	75	75	1,400	19	2,000
	250	250	5,000	20	2,000
Fluorescente					
"Blanco Frío"	40	48	2,770	66	20,000
"Blanco Frío" VHO+	215	225	11,500	67	10,000
"Gro Lux"	40	46	925	20	12,000
Descarga de alta intensidad					
Sodio a alta presión	400	425	45,000	117	24,000
	1,000	1,060	126,000	132	24,000
Sodio a baja presión	180	230	33,000	143	18,000
Halógeno metal	400	425	31,000	94	15,000
	1,000	1,060	100,000	118	10,000

*Incluye balasto o entrada auxiliar

+ Salida muy alta

Fuentes: Aldrich y Bartok (1989); Kauffman y Christiansen (1984)



A



B

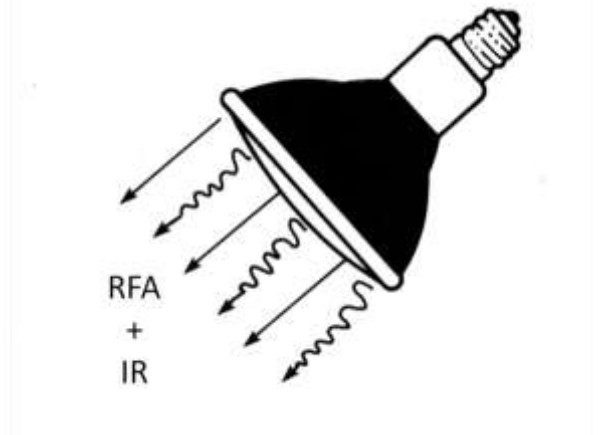


C

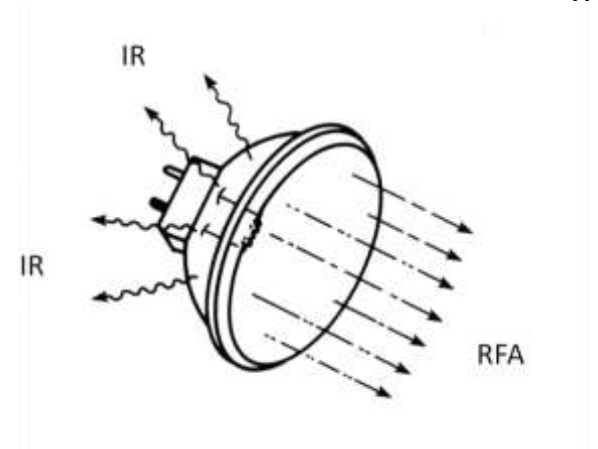


D

Figura 3.3.27 Muchos tipos diferentes de lámparas incandescentes (A-D) han sido utilizados como alumbrado fotosintético en viveros forestales que producen en contenedores. Algunos bulbos tienen reflectores internos (B-D), que dirigen la luz hacia el cultivo de plantas. Las lámparas incandescentes que son montadas típicamente en arreglos fijos en la parte superior, son usadas para proporcionar alumbrado intermitente (C-D).



A



B

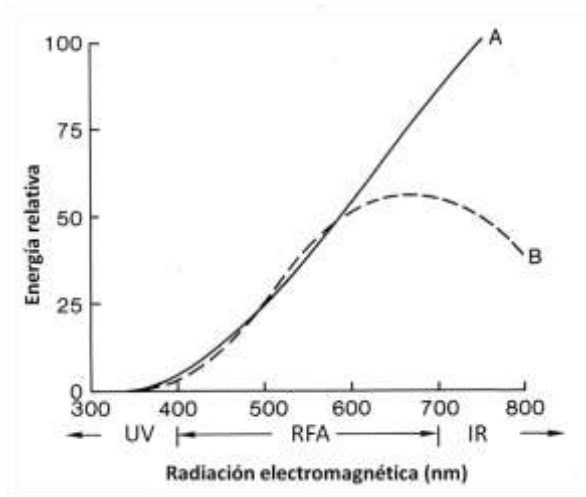


Figura 3.3.28 Las lámparas incandescentes típicas (A) producen un elevado porcentaje de radiación infrarroja (calor), pero pueden ser compradas con una cubierta especial en la parte posterior, la cual refleja la radiación fotosintéticamente activa (RFA) hacia el cultivo, mientras transmite la radiación infrarroja (IR) hacia atrás de la lámpara (B). La gráfica (C) muestra la diferencia en espectro entre las dos lámparas (Modificado de Bickford y Dunn, 1972).

Una adición relativamente nueva a la clase incandescente, es la lámpara de halógeno-tungsteno (también denominada "cuarzo halógeno"), la cual tiene la misma distribución de energía espectral que la lámpara incandescente estándar (Fig. 3.2.26A), pero con varias ventajas distintas, incluyendo una mayor vida del bulbo, y una mayor eficiencia con el mismo consumo de watts (Kaufman y Christensen, 1984; Cuadro 3.3.8). El bulbo, delgado y tubular, está hecho con vidrio de sílice-cuarzo, y un gas halógeno (yodo o bromo) que rodea el filamento de tungsteno y previene el oscurecimiento, que es típico de la lámpara incandescente (Bickford y Dunn, 1972). El tamaño pequeño de las lámparas de halógeno-tungsteno, les permite ser montadas en reflectores fijos más eficientes (Fig. 3.3.29). No obstante, tal como otros bulbos incandescentes, su eficiencia en energía es aún relativamente baja, en

comparación con otros tipos de lámparas (Cuadro 3.3.8).

Lámparas fluorescentes. Las lámparas fluorescentes producen luz cuando un arco de mercurio excita polvos fluorescentes (sustancias que pueden ser estimuladas para emitir luz por radiación incidente) que recubren las paredes internas del bulbo. La corriente eléctrica que fluye entre los electrodos en ambos extremos de la lámpara, produce un arco en el vapor de mercurio, generando radiación ultravioleta y excitando a los polvos para emitir luz (Kaufman y Christensen, 1984). Las lámparas fluorescentes contienen un circuito eléctrico complejo incluyendo un balasto, que proporciona el voltaje suficiente para iniciar la descarga eléctrica. Puesto que el encendedor en el bulbo se afecta con el uso, la vida de la lámpara es acortada si éstas son prendidas y apagadas con frecuencia (Bickford y Dunn, 1972).

Las lámparas fluorescentes están disponibles en una amplia variedad de distribuciones de energía espectral, dependiendo de las cubiertas específicas del bulbo; los bulbos del tipo "blanco-frío" son utilizados para la mayor parte de las aplicaciones hortícolas (Fig. 3.3.26B). El costo inicial de instalación de las lámparas fluorescentes, es el doble que el de las incandescentes, pero son más de tres veces eficientes en la producción de luz visible. Además pueden durar más de 12 veces, que las lámparas incandescentes estándares, cuidando que no sean prendidas y apagadas con frecuencia (Cuadro 3.3.8). Las lámparas fluorescentes son ampliamente usadas en las cámaras de cultivo, pues son una fuente de luz lineal que produce relativamente poca radiación infrarroja, lo cual es importante en un ambiente cerrado (Aldrich y Bartok, 1989). No obstante, las lámparas fluorescentes tienen varias desventajas. La intensidad de la luz por unidad de área generalmente es baja, aunque están a disposición bulbos especiales de salida alta (Cuadro 3.3.8).



Figura 3.3.29 Las lámparas de halógeno-tungsteno ("cuarzo halógeno") son otro tipo de luz incandescente que es utilizada para el alumbrado fotoperiódico continuo en los viveros que producen en contenedores. Los bulbos, relativamente pequeños y de elevada intensidad, son colocados en reflectores especiales que con frecuencia son montados en un modelo oblicuo fijo.

Las estructuras fijas de soporte del alumbrado son relativamente largas (Fig. 3.3.30A-B) y producen sombras indeseables, pero lo anterior puede ser reducido mediante la orientación de éstas de norte a sur, para que sus sombras se muevan. Las estructuras a prueba de agua son recomendables para los invernaderos. A reserva de estas restricciones, las lámparas fluorescentes están siendo usadas tanto para alumbrado fotosintético como para alumbrado fotoperiódico, en los viveros forestales que producen en contenedores, en los Estados Unidos y el Canadá (Cuadro 3.3.7). Si estas lámparas deben ser usadas, estarán mejor montadas sobre una estructura de riego (Fig. 3.3.30B).



A



B

Figura 3.3.30 Las lámparas fluorescentes han sido usadas para el alumbrado fotoperiódico continuo, pero los reflectores largos producen sombras (A). Si éstas son montadas sobre las estructuras de riego, entonces proporcionan alumbrado intermitente cuando la estructura se mueve hacia atrás y adelante (B).

Lámparas de descarga de alta intensidad. Estas lámparas compactas, de alta salida, se están haciendo populares como alumbrado hortícola, pues producen con eficiencia luz en las longitudes de onda de la RFA, y requieren de poco mantenimiento. Las lámparas de descarga de alta intensidad (DAI), generan luz mediante el paso de una corriente eléctrica a través de gas presurizado a elevada temperatura, causando que el gas brille. Para el efecto, son usados varios tipos de gases, incluyendo el sodio y el ioduro de mercurio (halógeno metal), que determinan tanto la intensidad como la calidad de la luz emitida (Fig. 3.3.26C-D). Puesto que toma varios minutos el generar la temperatura y la presión de gas necesarias, pasa algún tiempo antes de que las lámparas estén operando totalmente. Las estructuras para lámparas son relativamente largas porque requieren de un balasto para regular la corriente eléctrica (Fig. 3.3.31); algunos modelos están equipados para un balasteo remoto (Aldrich y Bartok, 1989). Todas las lámparas DAI son significativamente más eficientes energéticamente que otras fuentes de luz artificial (Cuadro 3.3.8).

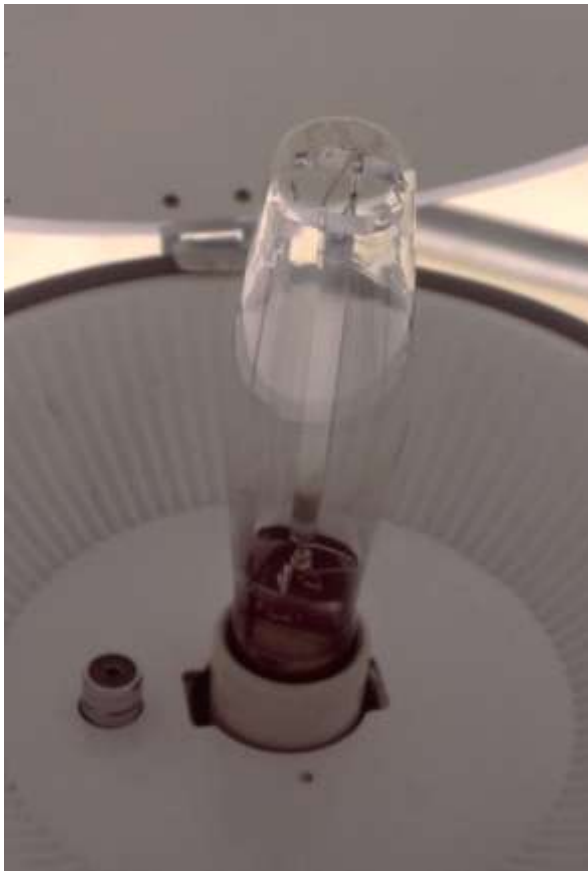
Sodio a alta presión. Las lámparas de sodio a alta presión (SAP) generan luz mediante el paso de una corriente eléctrica a través de vapor de sodio en un tubo arco elongado (Fig. 3.3.31A), el cual contiene un vidrio doble envolviendo para contener el vapor de sodio corrosivo (Kaufman y Christensen, 1984). La distribución de energía espectral se extiende a través del espectro visible, pero asciende abruptamente en las bandas amarillas, muy cerca del óptimo para el alargamiento de la fotosíntesis y del fotoperiodo. Se producen niveles muy bajos de luz infrarroja (Fig. 3.3.26C). Las lámparas DAI

emiten una luz muy intensa, así que las estructuras de soporte pueden estar espaciadas con suficiente amplitud para evitar el bloqueo de parte de la luz solar. Tanto las lámparas de 400W como las de 1,000W son usadas en los viveros. Tanto más grandes las lámparas, mayor su eficiencia, siempre y cuando sean montadas lo suficientemente elevadas en la estructura de cultivo. El desarrollo de un nuevo tubo arco de cerámica ha incrementado la vida de la lámpara sobre 20,000 horas (Cuadro 3.3.8). Las lámparas DAI son excelentes para alumbrado fotosintético y fotoperiódico en los viveros forestales que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7).

Sodio a baja presión. Las lámparas de sodio a baja presión (SBP) son las más eficientes en energía, de entre todos los tipos de alumbrado hortícola (Cuadro 3.3.8). Sus distribuciones de energía espectral son más restringidas que las lámparas de SAP (Aldrich y Bartok, 1989), pero esto no representa una desventaja. Estas lámparas son menos intensas y requieren de mayor espacio, creando así más sombras, y han sido utilizadas para el alumbrado fotoperiódico solamente en unos pocos viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7).

Halógeno metal. Estas lámparas son una modificación de las viejas lámparas de mercurio; el tubo arco contiene varios haluros metálicos (por ejemplo, disprosio e ioduro de talio, así como vapor de argón-mercurio (Kaufman y Christensen, 1984). En comparación con las lámparas de mercurio, las lámparas de halógeno metal producen un 50% más de salida de luz, en una distribución de energía espectral bien balanceada (Fig. 3.3.26D).

Las lámparas de halógeno metal están disponibles desde los 400W hasta los 1,000W, y tienen una esperanza de vida de 10,000 a 15,000 horas. Estas son poco usadas en los viveros forestales que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7), pues las lámparas de SAP son más eficientes y tienen una vida mucho mayor (Cuadro 3.3.8).



A



B



C



D

Figura 3.3.31 Las lámparas de sodio a alta presión (A-D), pueden ser usadas en el alumbrado foteriódico continuo, o en el alumbrado fotosintético suplementario, cuando son montadas en posiciones fijas en la parte superior (B). También son empleadas en montajes fijos oblicuos (C), o sobre las estructuras de riego, para proporcionar un alumbrado foteriódico intermitente (D).

Reflectores. Todos los tipos de lámparas empleadas en horticultura, requieren de algún tipo de reflector para enfocar la luz y distribuirla uniformemente sobre el área de cultivo. Los reflectores externos con frecuencia son comprados como parte de las estructuras de alumbrado (Fig. 3.3.29 a 3.3.31), pero también pueden ser hechizos (Fig.3.3.27A). Los tipos especializados de lámparas incandescentes tienen reflectores construidos dentro, como el caso del reflector parabólico aluminizado (en inglés, el acrónimo establecido PAR es desafortunadamente el mismo que el de la radiación fotosintéticamente activa). De particular interés es el reflector "dichroic", que refleja las longitudes de onda de la RFA hacia adelante, y transmite radiación infrarroja hacia atrás de la lámpara (Fig. 3.3.28).

3.3.4.4. Alumbrado fotosintético

Debido a los costos de la energía, no es práctica común el proveer suficiente luz artificial para incrementar la fotosíntesis en los viveros forestales que producen en contenedores. La excepción se da a grandes latitudes, donde a veces resulta económico el utilizar alumbrado fotosintético como suplemento de la luz natural durante el otoño, el invierno y la primavera (Bickford y Dunn, 1972). En el presente, sólo alrededor del 5% de los viveros forestales en los Estados Unidos y el Canadá proporcionan alumbrado fotosintético (Cuadro 3.3.7).

Intensidad de la luz. Si las luces artificiales son la única fuente de luz, como en una cámara de cultivo, el requerimiento mínimo para la producción comercial de plantas, se considera de aproximadamente $250 \mu\text{mol/s/m}^2$ (-20 Klx), lo cual

es aproximadamente un octavo de la intensidad normal de la luz solar (ASHRAE, 1989). Las luces deben también ser mantenidas prendidas por al menos 12 horas al día, para permitir tasas de crecimiento razonables. Las luces de gran intensidad generan una tremenda cantidad de calor, pero esto representa poco problema cuando el alumbrado fotosintético es usado durante la noche, por lo que el calor puede resultar de utilidad. Estos sistemas de alumbrado son caros de instalar y de operar, a menos que la electricidad sea muy barata.

Sin embargo, experimentos hortícolas recientes con alumbrado fotosintético suplementario, han demostrado que es posible obtener incrementos significativos en el crecimiento de la planta, especialmente en términos de peso anhidro. Al menos alguna de esta ganancia puede ser debida al calentamiento incidental del medio de cultivo (Downs, 1985). El alumbrado suplementario en ocasiones es necesitado para compensar el tiempo atmosférico nublado, o las sombras de la estructura del invernadero, o del equipo, o durante el invierno a grandes latitudes. Cuando se proporcionan 122 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (-10 Klx) de RFA durante 8 a 16 horas por día, las tasas de crecimiento pueden alcanzar las obtenidas en las cámaras de cultivo (ASHRAE, 1989). En Alberta, Canadá, donde la luz solar de diciembre es de solamente 70 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~3.8 Klx), 12 especies de coníferas respondieron fuertemente al alumbrado suplementario invernal. Dos sistemas de alumbrado fueron efectivos - 60 a 100 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~4.7 a 7.9 Klx) de alumbrado fluorescente, o 210 a 220 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~17.6 a 18.4 Klx) de alumbrado de sodio a alta presión, proporcionados por 18 a 24 horas por día (Dymock y Wilson, 1986). En Wisconsin, la adición de entre 18 a 63 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (~1.4 a 5.0 Klx) de RFA durante el invierno, incrementó significativamente el crecimiento de *Picea glauca* (Moench) Voss, *Pinus banisiana* Lamb. y de *Populus* híbridos (Roberts y Zavitkovski, 1981).

Calidad de la luz. Debido a que no todas las longitudes de onda son igualmente efectivas para la fotosíntesis, el alumbrado artificial debería ser alto en las bandas de la RFA (Fig. 3.3.1). Las longitudes de onda más efectivas son de 600 a 700 nm, en la parte roja del espectro visible; las luces azul, verde, y amarilla (400 a 600 nm), tienen solamente de un medio a dos tercios de la eficiencia de la luz roja. La luz infrarroja (>700 nm) no es efectiva para la fotosíntesis, pero es meramente absorbida e incrementa la temperatura foliar. La luz ultravioleta (<400 nm) es también inefectiva y puede ser dañina.

Las luces de sodio a alta presión son recomendables para el alumbrado fotosintético porque son las más efectivas y costo eficientes. Las lámparas de halógeno metal y las fluorescentes, también pueden ser usadas, pero son menos deseables en términos de salida de RFA por watt, y en esperanza de vida (Cuadro 3.3.8).

Ubicación y fijación de lámparas. Debido a la gran intensidad de luz que es necesitada, las lámparas del alumbrado fotosintético deben ser posicionadas cerca del cultivo. El montaje de lámparas fotosintéticas sobre la estructura de riego no puede producir un alumbrado continuo, por lo que éstas deben colocarse en un modelo fijo y regular, sobre el cultivo.

3.3.4.5 Alumbrado fotoperiódico

El mayor uso del alumbrado artificial en horticultura se da para extender el fotoperiodo (Bickford y Dunn, 1972). La mayoría de las plantas cultivadas para propósitos dasonómicos y de conservación, requieren de fotoperiodos extendidos para producir rápidas tasas de crecimiento, y también la mayor parte de las áreas están equipadas con algún tipo de alumbrado para incrementar artificialmente la luz del día (Cuadro 3.3.7). Los viveros en los climas del sur y en las áreas costeras con climas marítimos moderados, que cultivan ecotipos nativos, pueden no necesitar de alumbrado fotoperiódico (Ver la sección 3.3.2.2 para más información acerca de cuándo es necesitado este alumbrado).

La mayor parte de las principales lámparas tienen las longitudes de onda roja deseadas (Fig. 3.3.26) para el control del fotoperiodo, y los tipos de descarga incandescente, fluorescente, y de alta intensidad han sido usados con éxito. La selección de los mejores sistemas de alumbrado, por consiguiente, es de tipo económico, y se consideran también los planes del vivero. Si el área de cultivo está equipada con alumbrado fotosintético, este mismo puede ser empleado normalmente para extender la longitud del día.

Para que el alumbrado fotoperiódico sea totalmente efectivo, otros factores ambientales como la temperatura, la humedad, el agua y la nutrición mineral, deberían ser óptimos. Las plántulas bajo tensión no pueden responder normalmente a estímulos luminosos.

Tipos de alumbrado fotoperiódico. Una variedad de términos han sido utilizados para describir a los sistemas de alumbrado fotoperiódico, y esto ha resultado confuso, pues un término útil debe denotar tanto duración (el tiempo que las luces son dejadas

prendidas), como el momento en el que las luces son activadas.

La duración del alumbrado fotoperiódico ha sido tradicionalmente descrita como continua o intermitente, y los dos tipos han sido empleados con éxito. En el **alumbrado continuo**, las luces son prendidas durante periodos prolongados. Aunque muchos tipos de lámparas pueden ser usadas para el alumbrado continuo, los tipos (DAI) son la única opción costo eficiente, asimismo las lámparas de SAP son recomendadas.

En el alumbrado intermitente, la noche es interrumpida con periodos breves de luz a intervalos regulares de tiempo durante el periodo prescrito. Las luces pueden ser dejadas prendidas durante tan poco como un 3% del tiempo, proporcionando periodos oscuros no mayores de 30 minutos (Tinus y McDonald, 1979). Arnott y Mitchell (1982), reportaron que el proporcionar luz por 2 de cada 30 minutos resultó efectivo. El alumbrado intermitente puede ser obtenido en dos formas, dependiendo del tipo de lámparas usadas. Las luces que toleran un encendido repetido, como las lámparas incandescentes estándares, son montadas en arreglos fijos, mientras que aquellas que requieren balasteo deben ser montadas sobre una estructura de riego móvil, debido a su lento tiempo de encendido. En esta aplicación, las lámparas deben permanecer prendidas continuamente, y el alumbrado intermitente se consigue mediante el movimiento de la estructura hacia atrás y hacia adelante. Obviamente, esta opción de alumbrado sólo es práctica en viveros con estructuras de sistemas de riego.

Todos los tipos de lámparas han sido usados en estructuras de riego; incandescente (Fig. 3.3.27A), fluorescente (Fig. 3.3.30B), y sodio a alta presión (Fig. 3.3.32).

- **La interrupción de la noche**, es una técnica en la que las luces son encendidas durante unas pocas horas en medio de la noche, dividiéndola en dos periodos oscuros más cortos (Vince-Prue, 1975). Este tipo de alumbrado puede ser continuo o intermitente, aunque el primero es el más común.
- **El alumbrado de extensión del día** involucra el dar 2 a 4 horas de luz artificial después del atardecer o antes del amanecer (Nitsch, 1957). El alumbrado continuo es normalmente utilizado para la extensión del día.
- **El alumbrado durante toda la noche**, es una técnica en la cual el sistema de alumbrado es activado toda la noche. El alumbrado intermitente resulta la opción más económica.

Por tanto, para ser completamente precisos, los **sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos con un término que denote tanto duración como momento**, por ejemplo, "alumbrado temporal nocturno continuo", o "alumbrado intermitente durante toda la noche" (Fig. 3.3.32).

Han sido utilizados muchos tipos de sistemas de alumbrado fotoperiódico en los viveros forestales que producen en contenedores, y el mejor sistema dependerá del tipo de invernadero y del tipo de lámparas que estén disponibles. Cualquiera, el alumbrado continuo o el temporal nocturno, pueden ser tan efectivos como un más largo periodo de luz (Arnott, 1989). A veces es empleada la extensión continua de la longitud del día, pero resulta menos económica que otros sistemas. Se consiguió una reducción del 75% en el consumo eléctrico la vida de las lámparas fue incrementada considerablemente, cuando las lámparas de sodio a alta presión (SAP) fueron usadas para proporcionar un alumbrado temporal nocturno y continuo, en un vivero que produce en contenedores en la Columbia Británica (Forestry Canada, 1991). Las lámparas incandescentes estándares son comúnmente empleadas para producir alumbrado nocturno intermitente durante toda la noche, y los ahorros de energía en este caso han sido de 60 a 80%, en comparación con el alumbrado continuo (Bickford y Dunn, 1972). Independientemente de la economía, el proporcionar luz continua durante toda la noche (esto es, un fotoperiodo de 24 horas) no es deseable, y puede ser detrimental. El alumbrado continuo durante toda la noche puede reducir el crecimiento en altura, de plantas de árboles cultivadas en contenedores, tanto como un 30% (Tinus y McDonald, 1979).

Intensidad y calidad de la luz. Se han determinado en pruebas de investigación las intensidades de alumbrado fotoperiódico para muchas especies y ecotipos (Cuadro 3.3.5), y estas recomendaciones han sido validadas en viveros que producen en contenedores (Cuadro 3.3.7). Para asegurar que el alumbrado fotoperiódico sea efectivo, la intensidad de la luz debería ser de al menos $8 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~430 lx), y debería ser aumentada a $16 \mu\text{mol/s/m}^2$ (~860 lx) cuando el cultivo tiene un mayor requerimiento de luz. Algunas especies pueden ser cultivadas con menores intensidades de luz (Arnott y Macey, 1985). Si se desconoce la cantidad exacta de luz para una especie o ecotipo dados, siempre es mejor proporcionar más luz que arriesgarse a dar poca. Algunas especies que producen yemas y luego entran en dormancia requieren de frío antes de que puedan iniciar un nuevo crecimiento de la parte

aérea. Esto puede ser económicamente desastroso, porque el cultivo no tendrá las especificaciones de altura acordadas dentro de la programación de cultivo determinada.

Puesto que el fitocromo es estimulado por las cantidades relativas de luz roja-roja lejana, la salida de luz debería ser alta en la banda roja (600 a 700 nm) y baja en la banda roja lejana (700 a 800 nm) (ver sección 3.3.2.2 para más detalles).

Los viveros deberían tener una fuente de electricidad de respaldo para sus sistemas de alumbrado fotoperiódico, puesto que la pérdida de la extensión del día, aún por un breve lapso, puede ser perjudicial. Se ha mostrado en estudios que la falla de la luz durante un periodo de una noche (Arnott, 1984), o de tres noches (Arnott y Simmons, 1985), causa una reducción significativa en la altura de plantas de *Picea glauca* (Moench) Voss y de *Tsuga mertensiana* (Bong.) Carr, respectivamente. Los autores han observado una respuesta similar en *Picea engelmannii* Parry ex Engelm., (Fig. 3.3.12D), *Picea engelmannii* (Mill.), y *Fraxinus pennsylvanica* Marsh.

Fijación y posición de las lámparas. En los viveros que producen en contenedores, el alumbrado fotoperiódico es típicamente instalado en sistemas fijos o móviles. Aunque algunas lámparas pueden ser instaladas de cualquier manera, otras quedan mejor colocadas según un tipo específico.

Sistemas fijos. El alumbrado fotoperiódico, instalado en la parte superior en un modelo cuadrulado regular, o montado en un ángulo oblicuo sobre las paredes o postes, puede ser usado como alumbrado intermitente y como alumbrado continuo. Con cualquier tipo de montaje, la ubicación de las lámparas individuales es crítica, pues la intensidad de la luz puede variar en tres dimensiones.

Debido a que las luces pueden ser encendidas y apagadas con facilidad, las luces incandescentes estándar son frecuentemente montadas en modelos fijos en la parte superior, para producir alumbrado intermitente (Fig. 3.3.27C-D). Diferentes líneas o zonas del sistema de alumbrado pueden ser controladas mediante un reloj eléctrico que enciende las lámparas y las apaga a intervalos prescritos. En estructuras de cultivo más pequeñas, todas las lámparas pueden ser programadas para encenderse a la vez. En instalaciones de mayor envergadura, las etapas de alumbrado son designadas para encenderse secuencialmente, a efecto de reducir la demanda eléctrica total. Las lámparas de descarga de alta intensidad, como las

de SAP, también son montadas en modelos fijos en el techo, y su elevada salida de luz permite aumentar el espaciamiento (Fig. 3.3.31). Las lámparas fluorescentes rara vez son usadas de esta manera. Los dos tipos de estas lámparas requieren balastos, lo que significa que tienen tiempos de calentamiento largos, y que su vida útil será reducida por el frecuente encendido y apagado.

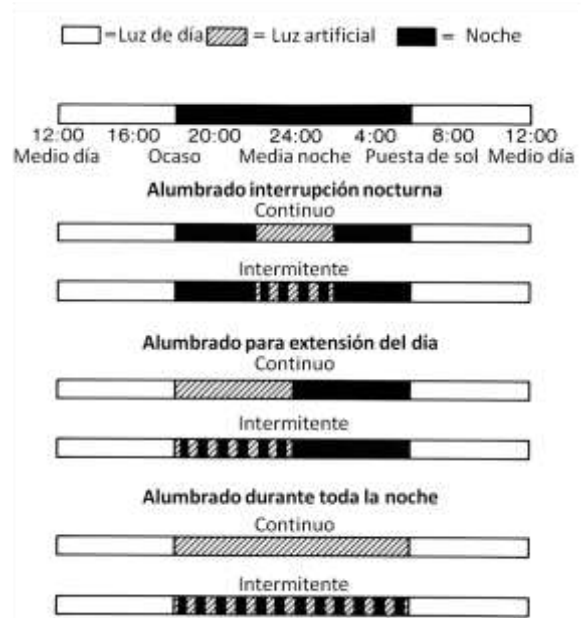


Figura 3.3.32 Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos en términos que denoten tanto la duración (cuánto tiempo serán dejadas encendidas las luces), como el momento (cuándo serán activadas las luces). La duración puede ser continua o intermitente, y las alternativas relativas al momento incluyen interrupción de la noche, extensión del día, o toda la noche. Las combinaciones de estos dos conceptos producen una nomenclatura precisa y descriptiva.

Las lámparas fotoperiódicas también pueden ser montadas oblicuamente alrededor del perímetro de un invernadero, o en el área de cultivo exterior, para producir un alumbrado continuo. Las lámparas de halógeno tungsteno de elevado wattage ("lámparas de flujo") comúnmente son usadas oblicuas en montajes fijos, debido a que sus estructuras contienen reflectores de ángulo amplio y pueden ser montados en cualquier ángulo (Fig. 3.3.29). En la Columbia Británica, en los viveros que producen en contenedores, a veces son montadas lámparas de SAP de 400W en forma oblicua, sobre las paredes de las estructuras de cultivo. En otro sistema único de alumbrado fijo, dos lámparas de SAP están montadas sobre una estructura de riego que es movida desde el sitio medio del área de cultivo y puesta en direcciones opuestas. La estructura es

movida del medio del área de cultivo cada noche (Arnott y Mitchell, 1992). Como resultado de su posicionamiento irregular, la intensidad de las luces fijas oblicuas debería ser cuidadosamente verificada para asegurar que todas las plantas estén recibiendo suficiente luz. Las sombras de las estructuras de soporte verticales pueden también representar un problema.

Sistemas móviles. El segundo tipo de sistemas de alumbrado fotoperiódico, usa lámparas montadas sobre estructuras de riego móviles, que producen alumbrado intermitente mediante el movimiento hacia atrás y adelante. Se requieren pocas lámparas y su modelo de traslape es crítico solamente en una dimensión. El alumbrado móvil es práctico en viveros que cuentan con sistemas de riego móviles, pero probablemente no será costo-eficiente si las estructuras son únicamente usadas para el alumbrado.

Muchos tipos diferentes de lámparas han sido utilizados en sistemas de alumbrado móviles, incluyendo las incandescentes (Fig. 3.3.27A) y las fluorescentes (Fig. 3.3.30B). Arnott (1974, 1976) recomienda la lámpara de sodio a alta presión (Fig. 3.3.31D). En viveros forestales que producen en contenedores de la Columbia Británica, las estructuras de cultivo con lámparas de SAP son pasadas sobre las plantas cada 25 a 30 minutos (Arnott y Mitchell, 1982). En un vivero, donde las estructuras de riego fueron usadas para alumbrado de interrupción nocturna, la estructura fue desplazada una longitud de 60 m (200 pies), en el invernadero, en 8 minutos (Arnott, 1989). Hallett (1982) reportó que los viveros en las Provincias Marítimas también usan alumbrado móvil para extender el fotoperiodo, con los carros de riego desplazándose entre las camas con una velocidad de 4 a 10 m/min (13 a 33 pies por minuto).

Los sistemas de alumbrado móviles tienen la ventaja de requerir solamente unas pocas lámparas para alcanzar el mismo resultado que un arreglo fijo mucho más grande. Sin embargo, los primeros tienen varias desventajas. Si la estructura funcionase mal, incluso durante un breve tiempo, las plantas pueden cesar su crecimiento y desarrollar yemas (Arnott y Mitchell, 1982). La proximidad de las boquillas de riego y de las lámparas fotoperiódicas puede producir problemas, ya que las soluciones de fertilizante líquido son corrosivas para las estructuras y para la maquinaria eléctrica. En los viveros forestales investigados en los Estados Unidos y el Canadá, estaban siendo usados sistemas de alumbrado móvil en alrededor del 20% de éstos.

Un tercer tipo de opción, recientemente desarrollado, utiliza una lámpara montada en el centro de un espejo parabólico oscilante (Fig. 3.3.33A) para recorrer un haz de luz sobre una gran área de cultivo (Fig. 3.3.33B). Este sistema utiliza lámparas de SAP, eficientes en el uso de energía, alumbrando continuamente, para proporcionar alumbrado intermitente.

Quando se diseña un sistema de alumbrado fotoperiódico, los administradores de viveros deberían consultar con un experto en alumbrado hortícola. El emplear la información de las especificaciones de fábrica acerca del alumbrado, o de otro vivero local puede ser fuente de dificultades, por lo que se recomienda especialmente que los viveristas prueben cualquier arreglo potencial bajo condiciones operativas.

Todos los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser verificados inmediatamente después de la instalación para lograr la uniformidad y la intensidad adecuadas. En particular, la intensidad de la luz nunca es completamente uniforme en instalaciones fijas en el techo. Las lámparas puestas fuera en rejilla, producen modelos circulares de intensidad, similares a los modelos de humedecimiento de los sistemas fijos de riego enclavados en el techo. La magnitud no siempre es evidente al ojo humano, pero la variación en la intensidad de la luz medida directamente bajo la lámpara, y entre lámparas, puede ser significativa (Fig. 3.3.24). Las instalaciones oblicuas producen una luz con forma de abanico, cuya intensidad decrece con la distancia. Por tanto, el modelo general de intensidad debería ser cuidadosamente mapeado, para asegurar que no existan áreas con niveles de intensidad de luz menores al mínimo recomendado. Si el alumbrado instalado resulta inadecuado en intensidad, en ocasiones el problema puede ser resuelto dejando las luces prendidas durante más tiempo; existe evidencia de una relación recíproca entre la duración y la intensidad de la luz, al menos para *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P. (Young y Hanover, 1977).



A



B

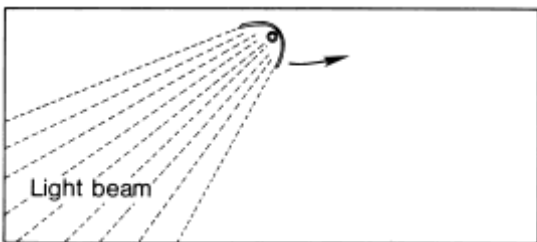
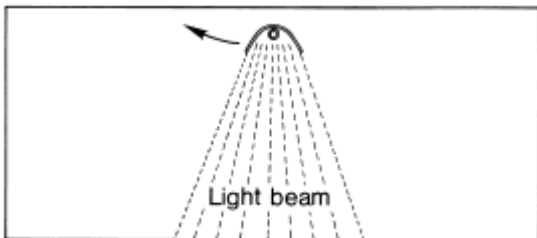
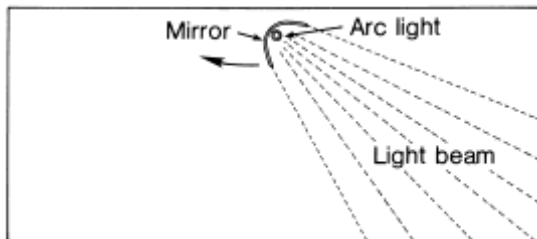


Figura 3.3.33 Un tipo de luz fotoperiódica recientemente desarrollado, tiene una lámpara de sodio a alta presión montada en el centro de un espejo oscilante (A, B). Este sistema produce un alumbrado intermitente, mediante la oscilación del espejo hacia atrás y adelante, a través del área de cultivo (C).

3.3.4.6 Tratamientos de día corto.

Mientras que el acortamiento del periodo oscuro con alumbrado fotoperiódico promueve el crecimiento de la parte aérea e inhibe la dormancia, el alargamiento del periodo oscuro estimula el cese del crecimiento en altura y el desarrollo de yemas. Así como un alumbrado fotoperiódico intermitente es tan efectivo como los mayores periodos con luz, un lapso relativamente corto de oscuridad ha funcionado bien. Estos tratamientos de día corto, o de "exclusión de la oscuridad" han sido empleados durante años en la industria de la floricultura, para promover la floración en plantas de día corto, pero sólo recientemente han sido adaptadas en los viveros forestales. Al principio, los administradores de viveros tenían que instalar y remover las cortinas manualmente cada día o usar sistemas manuales de cortinas hechizas. No obstante, en los últimos 10 años, han sido desarrollados sistemas de cortinas automáticos confiables (Vollebregt, 1989 a, b). Para incrementar su costo-eficiencia, pueden utilizarse cortinas de oscurecimiento con el propósito de reducir la pérdida de calor por las noches (Heacox, 1989) (Ver la sección 3.1.4.4 para una mayor discusión acerca de las cortinas calientes).

Las cortinas de oscurecimiento pueden ser construidas con varios y diferentes materiales. Originalmente, se emplearon telas de algodón negras, o cubiertas de polietileno. Las pruebas iniciales revelaron algunos problemas: la tela oscura absorbe la radiación solar, y las hojas impermeables retardan la ventilación, lo cual puede derivarse en niveles dañinos de calor en estructuras cerradas. Los criterios siguientes deberían ser considerados cuando se compra una cortina de oscurecimiento (Vollebregt, 1990):

- **Superficie reflectiva superior.** Las cortinas con una cubierta blanca o aluminizada (Fig. 3.3.35A), que reflejan tanto la radiación visible como la infrarroja, se mantendrán más frías que las hechas con otros materiales.
- **Porosidad.** Una cortina permeable no permitirá la condensación del agua, o goteo en la estructura. Una exposición prolongada al agua puede dañar la estructura o el sistema mecánico. Un material poroso también promoverá el intercambio de aire y reducirá la humedad del éste bajo la cubierta.
- **Plegabilidad.** Las cortinas de oscurecimiento deberían enrollarse o plegarse fácilmente y en poco espacio, para que no interfieran con la transmisión normal de la luz solar durante el día (Fig. 3.3.35B).



Figura 3.3.34 La intensidad del alumbrado fotoperiódico debería ser verificada en todos los sitios a través del área de cultivo. Con mucha frecuencia, la intensidad de la luz está bajo el mínimo crítico en los bordes. Las plántulas de *Picea engelmannii* a lo largo de la pared del invernadero, pueden no recibir suficiente luz y desarrollar yemas antes que el resto del cultivo.

Las cortinas automáticas de oscurecimiento (Fig. 3.3.75D), están disponibles para ajustarse a muchos tipos de estructuras de cultivo, y es mucho más fácil y más económica incorporar una cortina negra en un diseño original de invernadero, que ajustarse a una estructura ya diseñada. Las estructuras con hastial pueden ser ajustadas mediante cortinas que se enrollen y desenrollen a lo largo de las paredes laterales. Para la porción superior existen dos tipos de instalaciones básicas: los sistemas de canal en canal, que se desdoblán como un acordeón horizontalmente, a través del invernadero, y los sistemas de armazón en armazón, que se desenvuelven progresivamente, con frecuencia siguiendo la línea del techo. Para la instalación de cualquiera de estos sistemas es importante que no quede maquinaria suspendida, o en vertical, a través del techo (como una tubería de flujo). En los sistemas de canal en canal, la tela se mantiene plana sobre alambres a lo largo del fondo de los armazones. En los sistemas de armazón en armazón este puede ser el caso, pero la tela puede también estar suspendida contra parte de o todo el techo en el sitio más alto. Las cortinas de este tipo son máscaras de instalar, pero tienen la ventaja de que el equipo de control del clima, como el generador de dióxido de carbono, está montado en lo alto y puede ser usado cuando la cortina está colocada. Debido a la carencia de una pared vertical, la tela oscura es difícil de desplegar en algunos invernaderos.



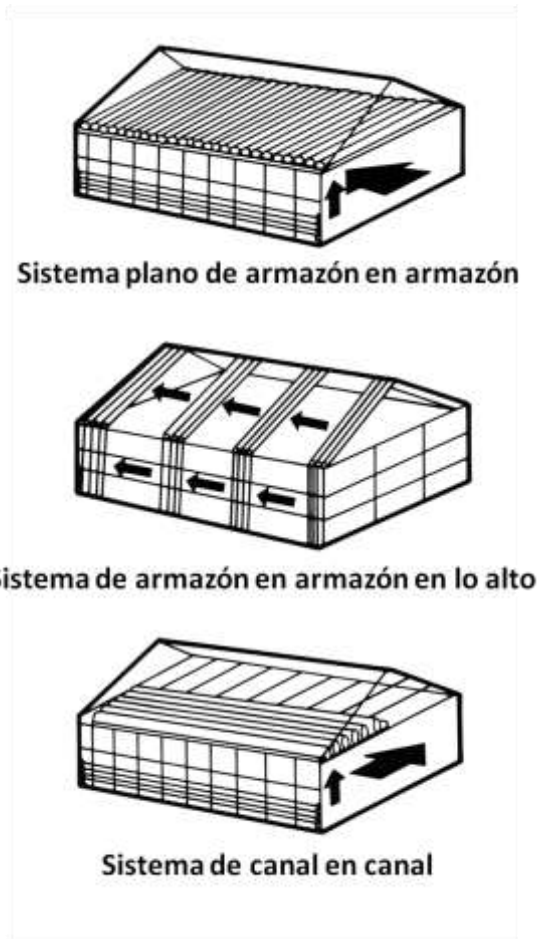
A



B



C



D

Figura 3.3.35 Los viveros que producen en contenedores a grandes latitudes, usan cortinas de oscurecimiento para excluir la luz y crear condiciones de día corto durante los largos días de medianos del verano. Algunas cortinas tienen una superficie exterior reflectiva, para eliminar con efectividad luz y calor (A). Los sistemas automáticos de cortinas, están disponibles para la mayoría de los tipos de estructuras de cultivo (B-D) (D, cortesía de Cravo Equipment, Ltd.).

El despliegue puede ser controlado mediante un sistema de relojería o una fotocelda, pero debería también tener un interruptor manual independiente. El control automático es muy útil para reducir los requerimientos de trabajo e incrementar la confiabilidad (Vollebregt, 1989ab, 1990; Weed, 1990).

En viveros canadienses que producen en contenedores, el tratamiento convencional es aplicar eliminación de oscuridad por un periodo de 10 días a 6 semanas, comenzando en julio (Matthews, 1983; Odlum, 1991). La longitud del periodo de día corto dependerá de la especie y ecotipo de las plantas y del objetivo del tratamiento. Periodos cortos de menos de 2 semanas tienden a predisponer el cultivo a fluir de nuevo si las condiciones de cultivo

son ideales, mientras que los tratamientos más largos, como los de 6 semanas, originan una reducción significativa en la acumulación de materia anhidra. Hawkins y Draper (1998) trataron plantas de *Picea* procedentes de 49 a 55° de latitud, con periodos de exclusión de oscuridad "dinámicos" que estimularon en forma natural las longitudes del día en forma decreciente. Aunque los periodos tan cortos como 2 semanas resultaron efectivos, estos investigadores encontraron que la mejor calidad de las plantas se consiguió con un fotoperiodo de 13 horas (Fig.3.3.36).

Debido a que las cortinas relativamente gruesas atrapan calor y humedad elevada alrededor del cultivo, los tratamientos con periodos de día corto deberían ser mantenidos tan brevemente como sea posible. Aplicando los tratamientos de día corto temprano en la mañana, en vez de hacerlo luego durante el día, se puede minimizar este problema (van Steenis, 1991). Un sistema de circulación de aire bajo las camas puede ser de utilidad. Varios viveros han tenido problemas con producción de lama en la parte aérea de la planta al quitar las cortinas de oscurecimiento (Fig. 3.3.16A). Es importante estar seguros de la ausencia de fuentes de luz adyacentes, como las de seguridad, que pueden alcanzar al cultivo, o de lo contrario las plantas pueden romper yemas (Colombo y Smith, 1984).

Una investigación reciente ha mostrado que los efectos fenológicos de los tratamientos de día corto pueden persistir durante al menos 1 año después de la plantación (Ver sección 3.3.2.2 para una mayor discusión).

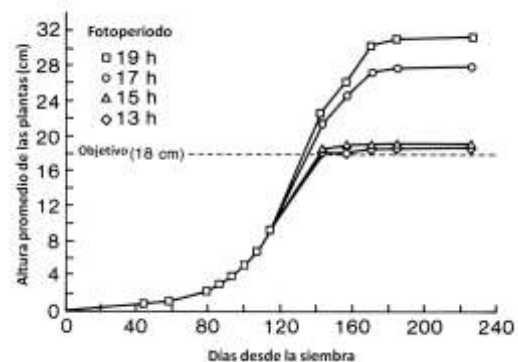


Figura 3.3.36 Los tratamientos de día corto por solamente unas pocas semanas, pueden ser efectivos en especies sensibles. Estas plantas de *Picea* detuvieron su crecimiento en altura y desarrollaron yemas a la altura - objetivo cuando recibieron tratamiento "dinámico" de días cortos, con horas de oscuridad durante 4 semanas (adaptado de Hawkins y Draper, 1988).

3.3.5 Sistemas de Monitoreo y Control de Luz

3.3.5.1 Midiendo los niveles de luz

El equipo apropiado de medición dependerá de los objetivos individuales y de la aplicación particular.

Fotómetros. Los fotómetros miden la energía radiante en el espectro visible; estos incluyen los "medidores de luz" comunes que son vendidos en tiendas fotográficas o en compañías proveedoras de laboratorios (Fig. 3.3.37A). Son portátiles, baratos (de U.S. \$50 a U.S. \$100), y dan lecturas en lux o en pies-candela (Aldrich y Bartok, 1989). Los fotómetros proporcionarán una medida de la intensidad solar, y pueden también ser usados para verificar los modelos de intensidad de las luces fotoperiódicas o fotosintéticas. Debido a que la calidad de las luces varía con el tipo de lámpara, las tablas de conversión deben ser compensadas por la diferencia entre la sensibilidad al espectro del medidor y el espectro de luz de la lámpara (Cuadro 3.3.3). Aún los medidores de luz construidos dentro de las cámaras fotográficas son útiles, porque los valores en lux o pies-candela pueden ser calculados a partir de la velocidad de la película, velocidad de disparo, y la apertura de lentes (Cuadro 3.3.9).



A



B



C

Figura 3.3.37 Los administradores de viveros que producen en contenedores, deberían verificar la intensidad de la luz solar dentro de sus estructuras de cultivo, y los modelos de intensidad de sus sistemas de alumbrado, con fotómetros. Están disponibles fotómetros portátiles y baratos, que dan lecturas en unidades de iluminación (A). Otros fotómetros más precisos dan lecturas digitales (B) y tienen distintos sensores que miden todos los aspectos de la intensidad de la luz en: unidades de energía o de iluminación (C) (B, C, cortesía de Li-Cor, Inc.).

Radiómetros. Los radiómetros miden la energía radiante sobre un amplio intervalo de longitudes de onda. Portátiles, y moderadamente caros (U.S. \$450), estos medidores tienen sensores separados (U.S. \$300) que pueden medir los tres aspectos de la radiación electromagnética: energía ($\mu\text{mol/s/m}^2$), radiación (W/m^2), e iluminación (lx) (Fig. 3.3.37B y C). Los registradores de datos (\$1,100) están disponibles también, y proporcionan lecturas continuas de luz, así como de temperatura y humedad relativa.

Un sensor de luz debe ser apropiadamente usado; éste podría ser puesto a nivel del cultivo, encarando la fuente de luz. Las lecturas deberían ser tomadas sobre un modelo reticular regular, a través de toda el área de cultivo, especialmente en los sitios que parezcan estar sombreados. Cuando se verifique el modelo de intensidad de las luces fotoperiódicas, tome lecturas directamente bajo y entre las lámparas, para determinar la intensidad mínima.

Cuadro 3.3.9 Procedimientos y conversiones en el uso de fotómetros de cámaras fotográficas para medir la intensidad de la luz.

1. Coloque la cámara a una velocidad de película ASA400 y a una velocidad del disparador de 1/30 segundos.
2. Ponga la cámara en la fuente de luz y lea la apertura del lente ("f-stop").
3. Use la tabla de abajo para determinar el brillo

f-stop	lux	Pie-candelas
1.0	16	1.5
1.4	32	3.0
2.0	63	6.0
2.8	125	12.0
4.0	250	23.0
5.6	500	47.0
8.0	1,000	93.0
11.0	2,000	190.0
16.0	4,000	375.0
22.0	6,000	750.0
32.0	16,000	1,500
45.0	32,150	3,000
65.0	64,300	6,000

Fuente: Eastman Kodak Co., Rochester, NY.

3.3.5.2 Sistemas de control

Los sistemas de alumbrado hortícolas, deben ser regulados con precisión para alcanzar el objetivo de cultivo deseado. La confiabilidad es crucial con el alumbrado fotoperiódico porque el sistema debe operar sin ser atendido durante la noche. Para ciertas especies sensibles, si las luces fallan incluso por una sola noche, la planta puede finalizar su crecimiento en altura. Una falla así puede resultar

desastrosa desde el punto de vista económico, porque algunas especies y ecotipos no reanudarán su crecimiento sino hasta que se haya satisfecho un requerimiento de enfriamiento, o exhibirán rompimiento de yemas a intervalos irregulares (Fig. 3.3.12). Por esta razón, es ventajoso el tener las luces fotosintéticas conectadas con el sistema de alarma del invernadero.

Existen dos tipos básicos de aparatos de control: de relojería y fotoceldas. Los de **relojería** - relojes electromecánicos o micro-procesadores en estado sólido - encienden las luces y las apagan a horas seleccionadas con antelación. En el sistema más simple, un reloj de 24 h enciende las luces al atardecer, y las apaga al amanecer, o durante un periodo menor durante la noche. Esto provee de un día largo, y puede también aumentar la fotosíntesis, dependiendo de la intensidad de la luz. Para el alumbrado fotoperiódico intermitente, un reloj con 60 divisiones con un ciclo de 6 a 30 minutos, puede operar en serie con el reloj de 24 horas, para proporcionar breves periodos de luz durante la noche. Las **fotoceldas** (Fig. 3.3.3.B) responden a cambios en la intensidad de la luz, y pueden ser usadas en conjunto con relojes, eliminando la necesidad de reprogramar el reloj después de cortes de electricidad, o conforme la longitud del día natural cambia a través del año. Para el alumbrado fotosintético, las fotoceldas pueden prender las luces cuando la intensidad de la luz solar descende bajo un nivel crítico (Aldrich y Bartok, 1989).



Figura 3.3.38 Las fotoceldas detectan cambios en la intensidad de la luz, y por tanto, pueden ser usadas para controlar los sistemas de alumbrado en invernaderos.

3.2.6 Conclusiones y Recomendaciones

La luz es el más complejo y variable de los factores limitativos que afectan el cultivo de plantas de especies forestales en contenedores. La luz afecta todas las diferentes fases del crecimiento y desarrollo de la planta, desde la germinación de la semilla, hasta el desarrollo de yemas y endurecimiento. La cantidad y tiempo de radiación solar afecta tanto la programación del cultivo como el número de cosechas que pueden lograrse por año. La localización del vivero y el tipo de estructura de cultivo, afecta la cantidad de luz que puede estar disponible para el cultivo de plantas.

Los administradores de viveros manejan la luz por dos razones: para aumentar la fotosíntesis, y para el control de la dormancia de la planta mediante la modificación del fotoperiodo, o longitud del día. Los viveristas pueden estimular altas tasas fotosintéticas complementando la luz del sol en áreas con una baja intensidad de luz natural. Pero, debido a las grandes intensidades de luz que son requeridas, usualmente no se considera económico el proporcionar suficiente alumbrado artificial para la fotosíntesis, aunque en algunos viveros se complementa la luz natural durante el otoño o el invierno. Si el alumbrado fotosintético es requerido, lámparas de sodio a alta presión deberían ser arregladas para producir aproximadamente $85 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 7.0 \text{ Klx}$) a nivel de la planta. Estas deben operar continuamente por varias horas para producir un efecto apreciable en el crecimiento de la planta.

Muchas especies forestales son muy sensibles al fotoperiodo, así que los viveristas pueden extender la estación de cultivo mediante el alumbrado fotoperiódico. Debido a que éste no es ni intenso ni continuo, el alumbrado fotoperiódico es una herramienta de cultivo relativamente barata para la obtención de cosechas uniformes de especies forestales producidas en contenedores. Aunque algunas especies y ecotipos de bajas latitudes y climas moderados no pueden responder a la extensión en el fotoperiodo, los ecotipos de grandes latitudes o elevaciones, o de climas continentales, la requieren. Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser descritos con un término que denote tanto la duración como la medida del tiempo. Muchos diferentes sistemas de alumbrado han sido usados en viveros forestales que producen en contenedores, y el mejor sistema dependerá de muchos factores, incluyendo el tipo de estructura de invernadero, y los tipos de lámparas que están disponibles. Con frecuencia la luz intermitente es más barata, aunque el alumbrado continuo también ha sido utilizado con eficiencia. La intensidad de la luz fotoperiódica debería ser de al menos 8

$\mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 430 \text{ lx}$), y debería ser aumentada a $16 \mu\text{mol/s/m}^2$ ($\sim 860 \text{ lx}$) cuando las especies o ecotipos tengan un mayor requerimiento de luz.

El fotoperiodo también puede ser acortado mediante la exclusión de la luz y creando condiciones de día corto. Los tratamientos de día corto son usados para detener el crecimiento en altura, desarrollar yemas completamente, e inducir rusticidad al frío en especies sensibles; esta técnica es usada principalmente en viveros a grandes latitudes. En muchos otros viveros, simplemente el apagar las luces fotoperiódicas resulta efectivo. Debido a que las cortinas de oscurecimiento afectan otras condiciones ambientales, especialmente la temperatura y la humedad, éstas deben ser usadas apropiadamente. Los viveristas deberían utilizar medidores de luz para verificar la cantidad de luz solar transmitida a través, de sus estructuras de cultivo. Las cubiertas con una pobre transmisión de luz deberían ser limpiadas o reemplazadas. Los sistemas de alumbrado fotoperiódico deberían ser revisados regularmente para asegurarse de que la intensidad mínima crítica está excedida en toda el área de cultivo. Las especies sensibles detendrán su crecimiento en altura y desarrollarán una yema terminal si son expuestas aunque sea tan sólo a una breve interrupción del alumbrado fotoperiódico, lo cual puede acarrear consecuencias desastrosas desde el punto de vista económico.

3.2.7 Literatura Citada

- Aldrich, R.A.; Bartok, J.W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Publication NRAES-33. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- ASHRAE, 1989. ASHRAE Handbook: fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc. 792 p.
- Arnott, J.T. 1991. Personal communication. Canadian Forestry Service, Victoria, BC.
- Arnott, J.T. 1989. Regulation of white spruce, Engelmann spruce and mountain hemlock seedling growth by controlling photoperiod. *Forestry (Supplement)* 62:157-168.
- Arnott, J.T. 1984. Photoperiod control of container seedlings. In: Landis, T. D., comp. Proceedings, Western Forest Nursery Council and Intermountain Nurseryman's Association. 1984 August 14-16; Coeur d'Alene, ID. Gen. Tech. Rep. INT-185. Ogden, UT:USDA Forest Service: 9-13.
- Arnott, J.T. 1979. Effect of light intensity during extended photoperiod on growth of amabilis fir, mountain hemlock, and Engelmann spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 9(1):82-89.
- Arnott, J.T. 1976. Container production of high elevation species. In: Proceedings, Joint Meeting of the Western Forest Nursery Council and the Intermountain Nurserymen's Association; 1976 August 10-12; Richmond, BC.
- Arnott, J.T. 1974. Growth response of white Engelmann spruce Provenance to extended photoperiod using continuous and intermittent light. *Canadian Journal of Forest Research* 4(1):69-75.
- Arnott, J.T.; Macey, D.E., 1985. Light intensity effect on white spruce, Engelmann spruce, and mountain hemlock seedlings grown under an extended photoperiod. *Canadian Journal of Forest Research* 15:295-300.
- Arnott, J.T.; Simmons, C.S., 1985. The effect of failure inextended and intermittent lighting on the growth of white spruce container seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 15(4):734-737.
- Arnott, J.T.; Mitchell, A. 1982. Influence of extended photoperiod on growth of white and Engelmann spruce seedlings in coastal British Columbia nurseries. In: Scarratt, J.B.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981 Sept. 14-16; Toronto, ON: Ontario Ministry of Natural Resources. COJFRC Sym. Proc. O-P-10:139-152.
- Bickford, E.D.; Dunn, S. 1972. Lighting for plant growth. Kent, OH: Kent State University Press. 221 p.
- Bongarten, B.C.; Hanover, J.W. 1985. Accelerating seedling growth through photoperiod extension for genetic testing: a case study with blue spruce (*Picea pungens*). *Forest Science* 31(3):631-643.
- Bormann, F.H. 1956. Ecological implications of changes in the photosynthetic response of *P. taeda* seedlings during ontogeny. *Ecology* 37:70-75.
- Brissette, J.C.; Elliott, M. Barnett, J.P. 1990. Producing container longleaf pine seedlings. Proceedings, Symposium on the management of longleaf pine. Gen. Tech. Rep. S0-75. 1989 April 4-6; Long Beach, MI. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station: 52-70.
- Cathey, H.M.; Campbell, L.E. 1977. Light frequency and color aid plant growth regulation. *American Nurseryman* (October 1977):16.
- Colombo, S.J.; Smith, W.A. 1984. Delayed bud initiation in black spruce container seedlings due to accidental day length extension. For. Res. Note 37. Maple, ON: Ontario Ministry of Natural Resources. 4 p.

- Colombo, S.J.; Webb, D.F.; Glerum, C. 1982. Cold hardiness and bud development under short days in black spruce and white spruce seedlings. In: Scarratt, J.D.; Glerum, C.; Plexman, C.A., eds. Proceedings, Canadian Containerized Tree Seedling Symposium; 1981. Sept. 14-16; Toronto, ON. Toronto: Ontario Ministry of Natural Resources. COJFRC Sym. Proc. O-P-10: 171-176.
- Downs, R.J. 1985. Irradiance and plant growth in greenhouses in winter. *Hortscience* 20(6): 1125-1127.
- Dymock, I.S.; Wilson, S. 1986. Effect of light quality and photoperiod on twelve coniferous species. In: Harvey, E.M. Proceedings, 1984 Prairie Federal-Provincial Nurserymen's Meeting. September 11-12; 1984, Edmonton, AB. Info. Rep. NOR-X-274. Edmonton, AB: Environment Canada, Northern Forestry Centre. 60 p.
- Environment Canada. FRA Nursery Report: optimum light intensity for growth of containerized Siberian larch seedlings. Indian Head, SA: 17-18.
- Forestry Canada. 1991. A better lighting system for container seedling nurseries. *Information Forestry* 17(2):8.
- Garzoli, K. 1988. Greenhouses. Canberra, Australia: Australian Government Publishing Service. 185 p.
- Gates, D.M. 1971. The flow of energy in the biosphere. In: Energy and power. San Francisco: W. H. Freeman and Company: 43-52.
- Gillies, S.L.; Vidaver, W. 1990. Resistance to photo-damage in evergreen conifers. *Physiologia Plantarum* 80(1):148-153.
- Gonzalez, A.; D'Aoust, A. L. 1988. Observations and measurements of containerized black spruce seedlings growing in a greenhouse. Info. Rep. LAU-XC-79E. Sainte-Foy, PQ: Canadian Forestry Service, Laurentian Forestry Centre. 70 p.
- Grossnickle, S.C.; Arnott, J.T.; Major, J.E.; Tschaplinski, T.J. 1991. Influence of dormancy induction treatments on western hemlock seedlings. I. Seedling development and stock quality assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 21:164-174.
- 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. COJFRC Proc. O-P-10.1981 September 14-16; Toronto. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service; Great Lakes Forest Research Centre: 129-138.
- Hanan, J.J.; Holley, W.D.; Goldsberry, K.L. 1978. Greenhouse management. Berlin: Springer-Verlag. 530 p.
- Hansen, M.C.; Biggs, W.W. 1979. Brochure D5-1180. Lincoln, NE:Li-Cor, Inc. 4 p.
- Hartmann, H.T.; Kester, D.E. 1983. Plant Propagation: principles and practices. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 727 p.
- Hartmann, H.T.; Flocker, W.J.; Kofranek, A.M. 1981. Plant Science: growth, development, and utilization of cultivated plants. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 676 p.
- Hawkins, C.D.B.; Draper, D.A. 1988. Height control of interior spruce by means of photoperiodic induction. In: Landis, T.D. tech. coord. Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 August 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech. Rep. RM-167. Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 45-49.
- Heacox, L.C. 1989. Made in the shade. *Greenhouse Grower* 7(4):26,28-29.
- Jones, L. 1961. Effect of light on germination of forest tree seeds. Proceedings of the International Seed Testing Association 26:437-452.
- Kaufman, J.E.; Christensen, J.F. 1984. IES lighting handbook: reference volume. New

York: Illuminating Engineering Society of North America.

Kozlowski, T.T.; Borger, G.A. 1971. Effect of temperature and light intensity early in ontogeny in growth of *Pinus resinosa* seedlings. Canadian Journal of Forest Research 1:57-65.

Kramer, P.J.; Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.

Kramer, P.J.; Decer, J.F., 1944. Relation between light intensity and rate of photosynthesis of loblolly pine and certain hardwoods. Plant Physiology 19:350-358.

Krasowski, M.J.; Owens, J.N. 1991. Growth and morphology of western redcedar seedlings as affected by photoperiod and moisture stress. Canadian Journal of Forest Research 21:340-352.

Krueger, K.W.; Ruth, R.H., 1969. Comparative photosynthesis of red alder, Douglas-fir, Sitka spruce, and western hemlock seedlings. Canadian Journal of Botany 47:519-527.

Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stresses, volume 2: water, radiation, salt, and other stresses. New York: Academic Press. 606 p.

Mastalerz, J.W. 1977. The greenhouse environment: the effect of environmental factors on the growth and development of flower crops. New York: John Wiley and Sons: 221.

Matthews, R.G. 1981: Seedling production for crown lands in British Columbia: guidelines for commercial container nurseries. Victoria, BC. 45 p.

McLemore, B.F. 1971. Light requirements for germination of loblolly pine seeds. Forest Science 17(3):285-286.

McMahon, M.J.; Kelly, J.W.; Decoteau, D.R. 1990. Spectral transmittance of selected construction and nursery shading material. Journal of Environmental Horticulture 8(3):118-121.

Nelson, P.V. 1985. Greenhouse operation and management, 3rd. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 598 p.

Nitsch, J.P. 1957. Growth responses of woody plants to photoperiodic stimuli. American Society of Horticultural Science Proceedings 70:512-525.

OnReilly, C.; Owens, J.N.; Arnott, J.T. 1989. Bud development in container-grown western hemlock seedlings subjected to different dormancy induction treatments. Forestry 62 (supplement): 169-179.

Odlum, K.D. 1991. Hardening and overwintering container stock in Ontario: practices and research. In: Proceedings, 11th annual conference of the Forest Nursery Association of British Columbia. 1991 September 23-26. Prince George, BC. (In Press)

Odlum, K.D.; Colombo, S.J. 1988. Short day exposure to induce bud break prolongs shoot growth in the following year. In: Landis, T.D., tech. coord. Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations; 1988 August 8-11; Vernon, BC. Gen. Tech. Rep. RM- 167, Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 57-59.

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. Seattle: University of Washington, Western College of Forest Resources, Institute of Forest Products: 108-117.

Reifsnyder, W.E.; Lull, H.W. 1965. Radiant energy in relation to forests. Tech. Bull. 1344. Washington, DC: USDA Forest Service. 111 p.

Roberts, P.S.; Zavitkovski, J. 1981. Growth of hybrid poplars, white spruce, and jack pine under artificial lights. Res. Pap. NC-206. St. Paul, MN: USDA Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 5 p.

- Ronco, R. 1970. Influence of high light intensity on survival of planted Engelmann spruce. *Forest Science* 16:331-339.
- Smith, H.; Whitelam, G.C. 1990. Phytochrome, a family of photoreceptors with multiple physiological roles. *Plant, Cell and Environment* 13(7):695-707.
- Thimijan, R.W.; Heins, R.D., 1983. Photometric, radiometric, and quantum units of measure: a review of procedures for interconversion. *Hortscience* 18(6):818-822.
- Thompson, S. 1982. 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. COJFRC Proc. O-P-10. Sault Ste. Marie, ON: Canadian Forestry Service, Great Lakes Forest Research Centre: 177-181.
- Tinus, R.W. 1970. Growing trees in a controlled environment. Western Reforestation Coordinating Committee Proceedings. 1970 December; Vancouver, BC. Portland, OR: Western Forestry and Conservation Association.
- Tinus, R.W. 1976. Growth of white spruce and lodgepole pine under various temperature and light conditions. Report: to Alberta Department of Energy and Natural Resources, Edmonton, AB (under cooperative agreement 16-573-CA with USDA Forest Service). 19 p.
- Tinus, R.W.; McDonald, S.E. 1979. How to grow tree seedlings in containers in greenhouse. Gen. Tech. Rep. RM-60. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 256 p.
- Tuller, S.E.; Peterson, M.J. 1988. The solar radiation environment of greenhouse-grown Douglas-fir seedlings. *Agricultural and Forest Meteorology* 44:49-65.
- U.S. Department of Agriculture. 1941. Climate and man: Yearbook of agriculture: 738-739.
- Van Steenis, E. 1991. Personal communication. Surrey, BC: British Columbia Ministry of Forests.
- Vince-Prue, D. 1975. *Photoperiodism in plants*. London: McGraw-Hill. 444 p.
- Vollebregt, R. 1989a. Curtain control: a manufacturer sheds light on environmental control in greenhouses. *American Nurseryman* 170(3):112-115, 118, 120-122.
- Vollebregt, R. 1989b. Establishing environmental control: to make your greenhouse a complete environmental control system, you must design a greenhouse with a curtain system in mind. *American Nurseryman* 170(4):53, 55, 57, 59-63.
- Vollebregt, R. 1990. Analysis of using curtain systems inside greenhouses for shading, cooling and heat retention. Brantford, ON: Cravo Equipment Co. 56 p.
- Weed, J. 1990. A look at automatic curtain systems. *Greenhouse Manager* 8(9): 132-134.
- Withrow, R.B.; Withrow, A.P. 1956. Generation, control, and measurement of visible and near visible radiant energy. In: Hollaender, A., ed. *Radiation biology, vol. 3, visible and near-visible light*. New York: McGraw-Hill Book Co.: 125-217.
- Young, E.; Hanover, J.W. 1977. Effects of quality, intensity, and duration of light breaks during a long night on dormancy in blue spruce (*Picea pungens* Engelm.) seedlings. *Plant Physiology* 60:271-273.



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

VOLUMEN 3

**Condiciones Ambientales
del Vivero**

**Capítulo 4
Dióxido de Carbono**

Contenido

3.4.1 Introducción	X
3.4.1.1 El dióxido de carbono en el ambiente	X
3.4.1.2 Definiciones y unidades	X
3.4.2 Papel del dióxido de carbono en el crecimiento y desarrollo de las plantas	X
3.4.2.1 El dióxido de carbono y la fotosíntesis	X
3.4.2.2 Respuesta del crecimiento al enriquecimiento con dióxido de carbono	X
3.4.2.3 Interacción del dióxido de carbono con otros factores	X
Luz	X
Temperatura	X
Agua y nutrimentos minerales	X
3.4.3 Niveles óptimos de dióxido de carbono	X
3.4.3.1 Fase de establecimiento	X
3.4.3.2 Fase de crecimiento rápido	X
3.4.3.3 Fase de endurecimiento	X
Fase de establecimiento	X
Fase de crecimiento rápido	X
Fase de endurecimiento	X
3.4.3.4 Propagación vegetativa	X
3.4.4 Modificando los niveles de dióxido de carbono en los viveros forestales que producen en contenedor	X
3.4.4.1 Aumentando la disponibilidad del dióxido de carbono en la ventilación	X
3.4.4.2 Complementando los niveles de dióxido de carbono	X
Fuentes de dióxido de carbono	X
Diseñando un sistema de enriquecimiento de dióxido de carbono	X
Problemas potenciales con los sistemas de combustión	X
3.4.5 Sistemas de monitoreo y control del dióxido de carbono	X
3.4.5.1 Midiendo los niveles de dióxido de carbono	X
3.4.5.2 Sistemas de control del dióxido de carbono	X
3.4.6 Conclusiones y Recomendaciones	X
3.4.7 Literatura Citada	X

3.4.1 Introducción

El dióxido de Carbono (CO₂) es un gas incoloro y sin olor. Ya que existe en cantidades relativamente pequeñas en el ambiente atmosférico, el CO₂ está considerado como el principal factor limitativo de la fotosíntesis bajo algunas condiciones de cultivo. En horticultura, el dióxido de carbono fue el último de los factores limitativos manejado en el cultivo. Los experimentos iniciales con enriquecimiento de CO₂ resultaron desalentadores, pues los elevados niveles de CO₂ produjeron una respuesta fitotóxica, la cual probablemente se debió a la presencia de contaminantes gaseosos. En 1918 fueron establecidos firmemente los efectos benéficos del enriquecimiento con CO₂ en el cultivo de plantas, pero la aplicación comercial no comenzó a divulgarse sino hasta mediados de los años sesenta (Bauerle *et al.*, 1986; Hicklenton, 1988).

El enriquecimiento con dióxido de carbono no es ampliamente practicado en los viveros que producen en contenedores. Solamente un 17% de los viveros en los Estados Unidos y Canadá, reportaron programas de manejo del CO₂ (Container Nursery Survey). La falta de interés no debería ser interpretada como una falta de importancia de este gas para el cultivo de plantas, puesto que en muchos estudios se ha demostrado que al aumentar los niveles de CO₂, se aceleran las tasas fotosintéticas (Kramer y Kozlowski, 1979).

3.4.1.1 El dióxido de carbono en el ambiente

Dos gases familiares constituyen el 99% en volumen de la atmósfera, el nitrógeno (78%) y el oxígeno (21%), mientras que el dióxido de carbono tiene una concentración promedio de solamente 0.035% (350 ppm). Sin embargo, no siempre ha sido este el caso, pues en la atmósfera primitiva el CO₂ era más común que el oxígeno. El rápido desarrollo de la vida vegetal, implicó la utilización de este CO₂ y la liberación de oxígeno, lo que hizo posible la evolución de organismos más grandes y avanzados. El nivel de CO₂ en la atmósfera terrestre parece haberse estabilizado en su

nivel mínimo (280 ppm) a mediados de los años 1,800. Desde esa época, la revolución industrial ha implicado el gradual aumento en las concentraciones ambientales de CO₂. La deforestación masiva y el consumo de combustibles fósiles, han originado que el nivel del CO₂ atmosférico aumente de 1 a 2 ppm anualmente.

Parece que esta tendencia no cambiará en un futuro cercano (Hicklenton, 1988). La preocupación en relación al "calentamiento global" ha derivado en muchos nuevos estudios sobre los efectos de elevados niveles de CO₂ en el crecimiento de los árboles en años recientes, y mucho de este trabajo ha sido hecho en plantas de especies forestales (ver sección 3.4.2.2).

El nivel ambiental de CO₂ alrededor de un vivero puede variar de 200 a 400 ppm, dependiendo de la localización; los valores más elevados se pueden registrar en las áreas industriales, debido a la combustión de combustibles fósiles, así como en áreas bajas húmedas, como pantanos y lechos de ríos, donde se encuentran materiales vegetales en descomposición (Nelson, 1985). La concentración de dióxido de carbono, medida en peso por unidad de volumen, también disminuye con la altitud, reduciéndose en aproximadamente un 40% a 4 500 msnm (14 800 pies snm), con respecto al nivel del mar (Kramer y Kozlowski, 1979).

3.4.1.2 Definiciones y unidades

Los niveles de dióxido de carbono pueden ser descritos y medidos en varias maneras diferentes. Debido a que es un gas, el CO₂ puede ser descrito en términos de unidades de presión, pero esta opción no es ampliamente utilizada para propósitos hortícolas. Los fisiólogos vegetales miden la fotosíntesis como la cantidad de CO₂ en peso consumida por unidad de volumen, expresada en miligramos por litro (mg/l), o en volumen, en microlitros por litro (μl/l). Pallas (1986) proporciona una completa discusión de las unidades que son usadas en investigación científica. Sin

embargo, para trabajo operativo en vivero, las unidades de concentración en por ciento (%), o en partes por millón (ppm), son las más simples y las más apropiadas para medir este gas.

3.4.2 Papel del Dióxido de Carbono en el Crecimiento y Desarrollo de las Plantas

El dióxido de carbono es uno de los 16 nutrimentos que son esenciales para el cultivo de plantas. Aproximadamente el 40% del peso anhidro de una planta típica está compuesto por carbón. Las plantas obtienen este carbón del CO₂ del aire en torno a los estomas, en las hojas (Fig. 3.1.2). El nivel normal de CO₂ en el ambiente, de aproximadamente 350 ppm, es considerado adecuado para un crecimiento "normal", aunque las plantas tienen la capacidad de utilizar cantidades mucho mayores. Esta capacidad, aparentemente se relaciona con las eras primitivas, cuando los niveles de CO₂ eran 10 a 100 veces mayores que en la actualidad (Nelson, 1985).

3.4.2.1 El dióxido de carbono y la fotosíntesis

Las plantas consumen CO₂ durante la fotosíntesis, y lo liberan a través de la respiración; durante las horas del día estos procesos ocurren simultáneamente (Fig. 3.3.5). Cuando el nivel ambiental de CO₂ alcanza el punto de compensación, el punto en el cual la fotosíntesis y la respiración son iguales, la plántula no crecerá, solamente se mantendrá. En los invernaderos, esta situación solamente ocurre en los días fríos y con sol, cuando las ventilas están cerradas. Con niveles de CO₂ superiores al punto de compensación, es decir con 40 a 60 ppm para la mayoría de las plantas comúnmente cultivadas, la fotosíntesis neta es positiva, siempre que otros factores críticos no sean limitativos (Ludlow y Jarvis, 1971; Hignbotham *et al.*, 1985).

Los niveles de dióxido de carbono siguen un patrón diurno típico, dentro del ambiente cerrado de un invernadero (Fig. 3.4.1). Por la noche, las plantas verdes liberan CO₂ a través de la respiración, de manera que la concentración del gas aumenta hasta unas 400 ppm; sin embargo, al amanecer la fotosíntesis comienza y la concentración se reduce rápidamente. La concentración de CO₂ se hace críticamente baja en un invernadero en los días fríos y nublados, cuando no se requiere de ventilación; en un invernadero con sólo dos intercambios de aire por hora o menos, la

concentración de CO₂ con frecuencia cae bajo las 200 ppm y limita la fotosíntesis (Holley, 1965). Las mediciones ambientales dentro de un invernadero, han demostrado que la concentración diaria promedio de CO₂ varió significativamente durante el mes de febrero y que alcanzó su menor nivel cuando la temperatura exterior era fría y las ventilas se mantuvieron cerradas (Fig. 3.4.2). Bajo condiciones de calma, los niveles de CO₂ pueden ser limitativos en cultivos densos a campo abierto, resultando en una reducción de 10 a 20% en la tasa fotosintética (Chang, 1968).

Conforme las concentraciones de CO₂ son aumentadas por encima de los niveles ambientales, la tasa fotosintética aumenta porque las altas concentraciones aumentan el gradiente de difusión del aire ambiental a través de los estomas, a las células del mesófilo, donde los cloroplastos utilizan el CO₂ en la fotosíntesis. La foto-respiración, que ocurre a elevados niveles de luz y causa pérdida de CO₂, es también suprimida con elevadas concentraciones de CO₂, que después aumentarán la fotosíntesis neta (Tinus, 1975; Pearcy *et al.*, 1987).

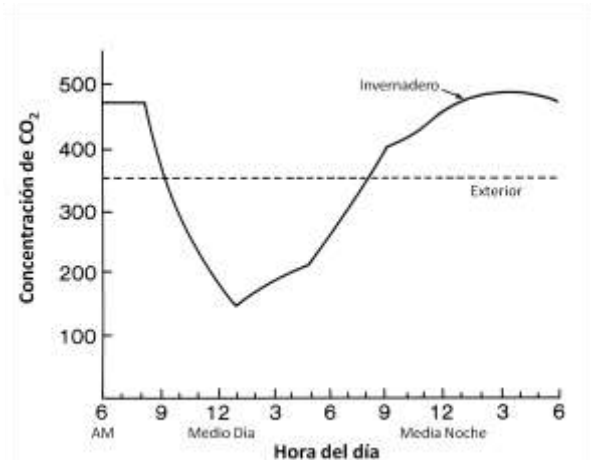


Figura 3.4.1 Los niveles de dióxido de carbono en un invernadero cerrado siguen un patrón diurno típico, elevándose durante la noche gracias a la respiración de las plantas, y posteriormente reduciéndose con rapidez en la mañana, cuando la tasa fotosintética es mayor (modificada de Aldrich y Bartok, 1989).

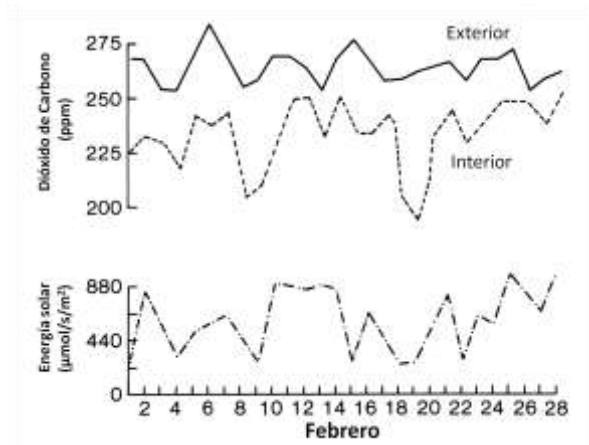


Figura 3.4.2 Durante el invierno, los niveles promedio diarios de CO₂ dentro de un invernadero se mantienen significativamente menores que los niveles ambientales, debido a las relativamente pocas horas de ventilación. Note que los niveles interiores de CO₂ son mayores en los días soleados, cuando las ventilas se mantienen abiertas durante más tiempo (Modificado de Hanan *et al.*, 1978).

3.4.2.2 Respuesta en crecimiento al enriquecimiento con dióxido de carbono.

Las tasas de crecimiento de las plántulas aumentan cuando el fotosintato neto es transportado de las hojas, donde fotosíntesis toma lugar, hacia los meristemos, donde ocurre el crecimiento. Hay numerosos estudios sobre los efectos benéficos de los altos niveles de CO₂ en el crecimiento de plantas de árboles. En *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws., la altura, el diámetro del tallo y el volumen total, aumentaron con incrementos en la concentración de CO₂, aunque en dos fuentes de semilla se hallaron distintos modelos de respuesta de crecimiento (Surano *et al.*, 1986). Tolley y Strain (1984), encontraron aumentos en la altura de la parte aérea, área foliar, y biomasa en plántulas de *Pinus taeda* L. y *Liquidambar styraciflua* L., y reportaron que la respuesta en crecimiento de la última especie, fue mayor que la de la primera. Plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. cultivadas con niveles altos de CO₂, produjeron un mayor crecimiento foliar, y una mayor altura de la parte aérea, con respecto a los testigos. Análisis de biomasa mostraron que el crecimiento de la raíz resultó particularmente estimulado (Fig. 3.4.3). Los autores concluyeron que la combinación de área foliar

aumentada y producción de raíces, pueden acortar el periodo de producción en vivero.

Existe un límite superior para el efecto estimulante de las concentraciones elevadas de CO₂ en muchas plantas. Las altas concentraciones de CO₂ pueden originar cierre estomatal, que automáticamente reduce la cantidad de CO₂ que puede entrar a la hoja. En adición, el más rápido crecimiento causado por una elevada concentración de CO₂, usualmente resulta en una reducción de otro factor que limita la fotosíntesis, y por ende el crecimiento.

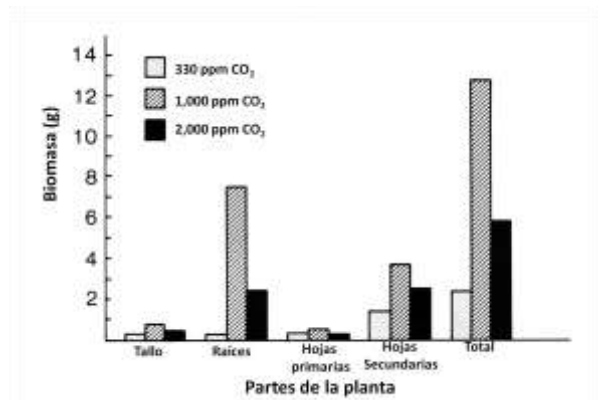


Figura 3.4.3 Después de 5 meses, la biomasa de las plantas enteras de *Pinus contorta* y sus diferentes componentes, fueron mayores en las que recibieron 1,000 ppm de CO₂. La biomasa del sistema radical y la de las hojas secundarias, mostró el mayor incremento como respuesta al enriquecimiento de CO₂ en el ambiente (Adaptado de Higginbotham *et al.*, 1985).

3.4.2.3 Interacción del dióxido de carbono con otros factores.

Los efectos fisiológicos del CO₂ no deben ser considerados en lo individual, puesto que están fuertemente interrelacionados con los efectos de otros factores limitativos en el crecimiento de la planta, especialmente la luz, la temperatura, el agua, y los nutrientes minerales (Blackman, 1905). Conforme la concentración de CO₂ cambia y la tasa fotosintética varía, los niveles óptimos de otros factores ambientales pueden cambiar.

Luz. La fotosíntesis medida como la utilización de CO₂, aumenta linealmente con la luz hasta que se alcanza el punto de saturación por luz. Mientras otros factores no sean limitativos, el

punto de saturación por luz se hace progresivamente mayor conforme las intensidades de luz y la concentración de CO₂ aumentan (Fig. 3.4.4). En efecto, los elevados niveles de CO₂ pueden, en alguna medida, compensar los bajos niveles de luz (Tolley y Strain, 1984), que con frecuencia acontecen en los días nublados de invierno. Cuando tales condiciones ocurren, el alumbrado fotosintético complementario a veces es utilizado para promover el crecimiento del cultivo; el enriquecimiento de CO₂ es esencial para obtener todos los beneficios de la luz adicional (Hicklenton, 1988) (Ver el Capítulo 3 de este volumen para mayor información sobre los efectos de la luz en la fotosíntesis).

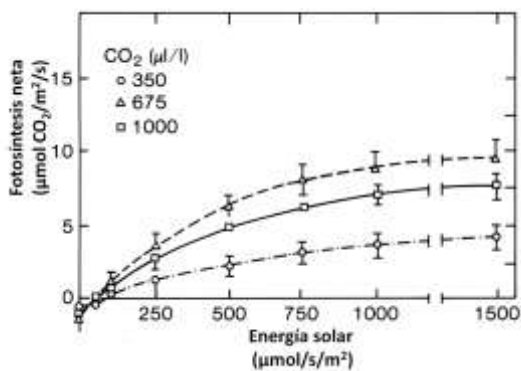


Figura 3.3.4 Los efectos del CO₂ suplementario en la fotosíntesis, son fuertemente dependientes de la intensidad de la luz. Estas plantas de *Liquidambar styraciflua* alcanzaron la saturación por luz a cada vez mayores intensidades de luz, cuando los niveles de CO₂ fueron progresivamente aumentados artificialmente.

La radiación solar también tiene un efecto directo en el régimen térmico en el ambiente de un invernadero cerrado. Debido a que la luz solar es convertida en radiación térmica en un invernadero, la cantidad de luz solar influye directamente la necesidad de enfriamiento por ventilación. Así, el nivel de luz diario promedio está directamente relacionado con la concentración de CO₂ en una estructura de este tipo durante el invierno (Fig. 3.4.2).

Temperatura. Para muchas especies vegetales, la temperatura óptima para la fotosíntesis aumenta cuando la concentración de CO₂ es incrementada. Por tanto, las ventilas del invernadero pueden ser mantenidas cerradas durante mucho tiempo, conservando

la temperatura unos 3 a 6°C (5 a 10°F) más cálida que en el exterior, con lo que a su vez se prolongará la exposición de la planta a altos niveles de CO₂ (Nelson, 1985). Del mismo modo, la tolerancia a elevadas temperaturas significa un menor requerimiento de sombreado. Por tanto, los elevados niveles de CO₂, más luz, y una mayor temperatura, actúan sinérgicamente sobre el punto donde otros problemas limitan el crecimiento.

Cuando los estomas se cierran a elevados niveles de CO₂, la evapotranspiración cesa, y las plantas pueden resultar dañadas por las elevadas temperaturas foliares. Por ejemplo, Surano *et al.* (1986) encontraron en plantas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. que el enfriamiento transpiracional fue muy reducido cuando fueron cultivadas con elevados niveles de CO₂, en cámaras de cultivo especiales, y que la temperatura de las acículas alcanzó 45°C (114°F). La reducción en la transpiración estuvo acompañada por un aumento en la producción de etileno, que puede ser indicador de tensión por calor. La respuesta estomatal a elevados niveles de CO₂ varía entre las especies: por ejemplo, la apertura estomatal en plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. resultó no afectada por concentraciones de CO₂ superiores a 2,000 ppm (Higginbotham *et al.*, 1985). Ya que las plántulas son sensibles al calor, el cierre estomatal puede acarrear daños por calor en viveros con ambiente enriquecido en los niveles de CO₂.

Agua y nutrientes minerales. Las rápidas tasas de crecimiento de las plantas cultivadas en ambientes ricos en CO₂ resultan en un incremento en el consumo de agua y nutrientes minerales (Hicklenton, 1988). El uso del agua por la planta aumentará porque al crecer en tamaño el follaje, éste tendrá una mayor superficie transpiracional. Sin embargo, puesto que los estomas comienzan a cerrarse ante elevados niveles de CO₂, la eficiencia en el uso del agua por las plantas también debería aumentar. Esto fue aparentemente el caso de un experimento con *Pinus radiata* D. Don, donde las plantas bajo tensión hídrica tuvieron una mayor respuesta de crecimiento que aquellas con niveles adecuados de agua (Conroy *et al.*, 1986).

El aumento en el crecimiento, resultante de la elevada tasa fotosintética, también crea demanda de más nutrimentos, pero su absorción no es consistente para todos ellos. En *Pinus virginiana* Mill., la absorción de nitrógeno y calcio aumentó durante el enriquecimiento con CO₂, pero la absorción de fósforo y potasio resultó no afectada (Luxmore *et al.*, 1986). Plantas de *Populus* spp. y de *Picea glauca* (Moench) Voss respondieron diferencialmente al enriquecimiento con CO₂ y a la fertilización con nitrógeno.

Las biomásas de la raíz, el tallo y las hojas de *Populus* spp. fueron mayores tanto a niveles elevados como pobres de nitrógeno, mientras que únicamente la masa foliar de *Picea glauca* (Moench) Voss resultó significativamente incrementada, y solamente con elevados niveles de nitrógeno. Sin embargo, el aumento en la tasa de crecimiento de las plantas de *Populus* spp. no pudo persistir, porque se originaron deficiencias en nutrimentos minerales a causa del rápido crecimiento (Brown y Higginbotham, 1986). Una respuesta similar se notó con plantas de *Castanea sativa* Mill.: las hojas cultivadas en ambiente rico en CO₂ se hicieron prematuramente cloróticas, lo cual fue atribuido a la dilución de nutrimentos resultantes de la rápida tasa de crecimiento (Mousseau y Enoch, 1989).

Los viveristas que proporcionan CO₂ adicional a sus cultivos, tienen que estar conscientes de los problemas potenciales y hacer los ajustes necesarios a sus regímenes de cultivo. En general, los viveristas que fertilizan con cada riego no deberían tener problemas, pero aquellos que fertilizan en forma intermitente, pueden necesitar realizar dicha práctica con mayor frecuencia, o con mayores concentraciones de nutrimentos.

3.4.3 Niveles óptimos de Dióxido de Carbono

El nivel óptimo de CO₂ dependerá de la especie que se esté cultivando y de la etapa de desarrollo de la planta. Muchos invernaderos ornamentales tratan de mantener concentraciones de CO₂ de entre 600 a 1,500 ppm (Freeman, 1985). Pruebas de investigación con plantas de árboles han demostrado respuestas positivas en el crecimiento a 1,000 ppm o menos. Sionit y Kramer (1986) proporcionan una amplia lista de respuestas de las plantas leñosas al enriquecimiento con CO₂. Los niveles de dióxido de carbono a más de 1,500 ppm no han resultado en un crecimiento adicional, aunque mucha investigación ha sido realizada con intensidades de luz equivalentes a 20 - 30% de la luz solar plena, y por tanto, no se puede predecir con precisión qué pasará en un invernadero. La fitotoxicidad puede ocurrir por encima de 2,500 ppm en algunas especies (Cuadro 3.4.1).

Cuadro 3.4.1 Efectos de los niveles de dióxido de carbono en las plantas y trabajadores en los viveros forestales que producen en contenedores.

Respuesta	Concentración de Dióxido de Carbono (ppm)
Efectos en las plantas	
Crecimiento negativo	< 100
Punto de compensación por CO ₂	50 - 100
Reducción de la tasa de crecimiento	100 - 350
Nivel de CO ₂ ambiental	350
Promoción de la tasa de crecimiento	350 - 1,000
Beneficios marginales	1,000 - 2,500
Posibilidad de efectos adversos	2,500
Efectos en el hombre	
Límite de exposición al trabajador	5,000
Dolor de cabeza y apatía	> 5,000
Pérdida de conciencia y muerte	> 80,000

Compilado de diversas fuentes

3.4.3.1 Fase de establecimiento

Está en tela de juicio el que tanto es benéfica la promoción de los niveles de CO₂ durante la germinación de la semilla y el establecimiento temprano. Las plantas jóvenes tienen niveles óptimos ligeramente mayores de CO₂ que las plantas más viejas (Chang, 1968), pero la pequeña superficie de los cotiledones y acículas primarias significa menor capacidad fotosintética. La mayor parte de las pruebas de

investigación han proporcionado el CO₂ durante varias semanas después que las plántulas se han establecido. Sin embargo, Yeatman (1970) halló una respuesta positiva definitiva cuando las germinantes de cuatro especies de coníferas fueron cultivadas bajo ambiente rico en CO₂, con dos niveles distintos de luz (Fig. 3.4.5). En todos los casos se encontró, que el suplemento de CO₂ a 900 ppm que produce plantas más largas dos semanas después de la germinación, pero la respuesta a un mayor nivel de CO₂ fue variable.

3.4.3.2 Fase de crecimiento rápido

Las plántulas muestran la mayor respuesta a altos niveles de CO₂ en la fase de crecimiento rápido, y el tratamiento usualmente comienza alrededor de 1 mes después de la siembra. Campagna y Margolis (1989) proporcionaron niveles elevados de CO₂ a plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. en diferentes estadios de desarrollo, y encontraron una respuesta significativa en crecimiento durante los primeros 3 meses de la estación de crecimiento, cuando las plantas tenían la mayor cantidad de superficie activa fotosintéticamente. Las plantas de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. mostraron una respuesta positiva tanto en la altura de la parte aérea como en la superficie foliar (Fig. 3.4.6), a través de una estación de cultivo de 5 meses (Higginbotham *et al.*, 1985). Un nivel de 1,000 ppm de CO₂ resultó más efectivo que una mayor concentración. Las plantas de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws. y de *Picea engelmannii* (Mill.) B.S.P. cultivadas durante 1 año a 1,200 ppm de CO₂, fueron de 50 a 70 % más pesadas que aquéllas cultivadas a 325 ppm (Tinus, 1972).

3.4.3.3 Fase de endurecimiento

Los beneficios del enriquecimiento con CO₂ declinan durante la fase de endurecimiento. Unas plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. cultivadas en un ambiente rico en CO₂ durante fines del verano, no aumentaron ni su altura ni su biomasa, aunque las plantas tratadas temprano en la estación de crecimiento, sí

tuvieron respuestas significativas (Campagna y Margolis, 1999). Un ambiente enriquecido con CO₂ puede ser detrimental para el desarrollo de la rusticidad al frío en las plántulas. Unas plantas de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. cultivadas bajo elevados niveles de CO₂, endurecieron más lentamente que las plantas control, y subsecuentemente sufrieron grandes daños por heladas (Margolis y Vezina, 1990). Los niveles enriquecidos de CO₂ prolongan la suculencia de las plantas, lo que

las hace más susceptibles a daños por frío y a otras tensiones. Los niveles elevados de CO₂ retardan la abscisión de la hoja en las latifoliadas deciduas, y pueden estimular el rompimiento de yemas y un reflujó en el crecimiento. Por tanto, los administradores de viveros forestales que producen en contenedores deberían terminar con el tratamiento de CO₂ antes del comienzo de los tratamientos de tensión utilizados para iniciar la dormancia.

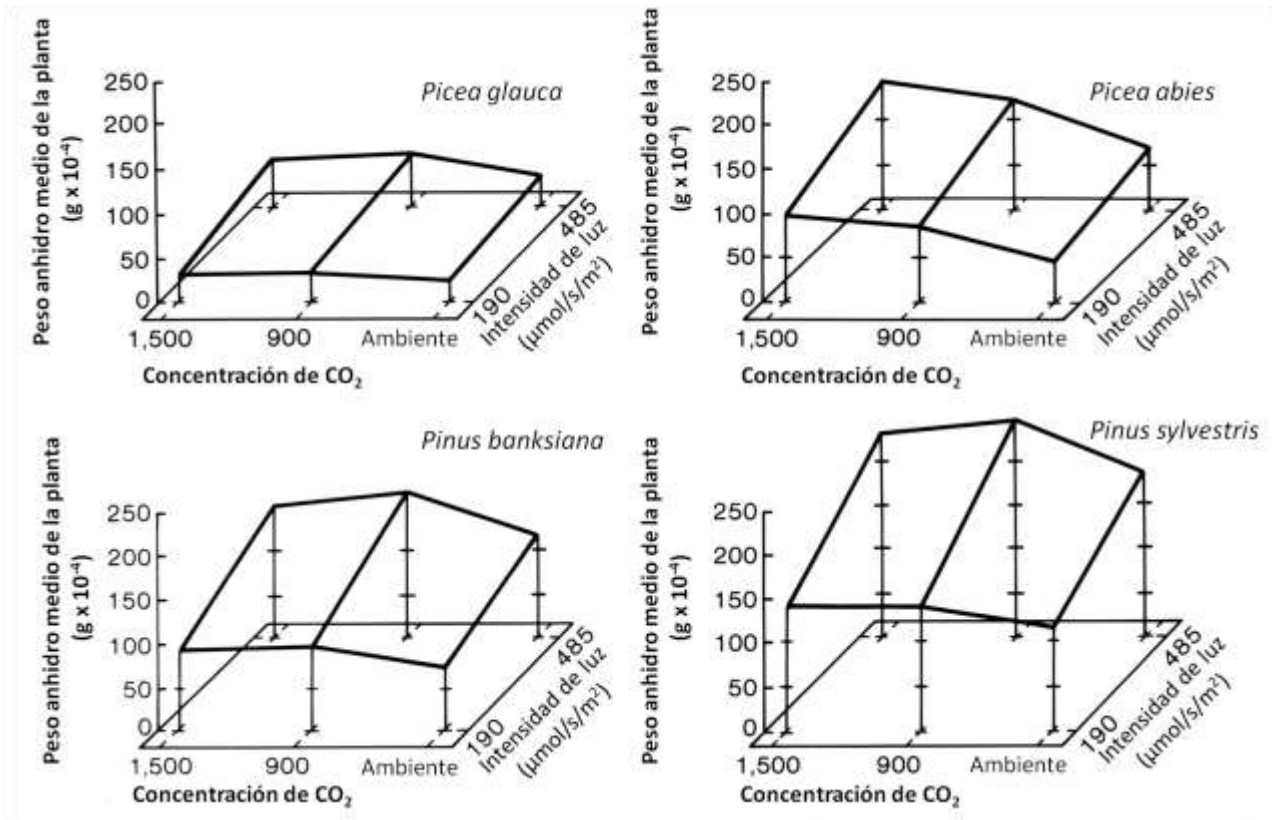


Figura 3.4.5 Aún las plántulas germinantes de 3 semanas de edad mostraron una respuesta positiva al enriquecimiento con CO₂, a pesar de que el mayor nivel de luz probado fue sólo de aproximadamente 27% de la luz solar plena (modificado de Yeatman, 1970).

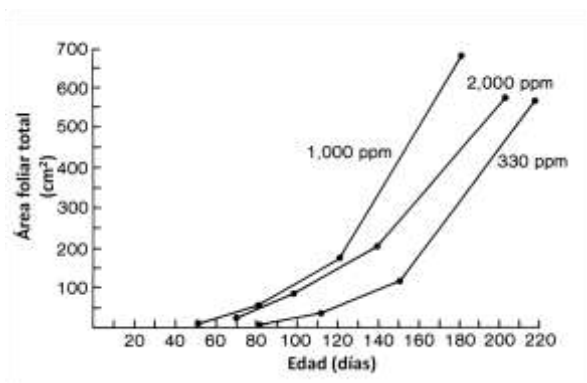


Figura 3.4.6 Los efectos benéficos de los niveles enriquecidos de CO₂ pueden acelerarse durante la estación de cultivo, porque las hojas grandes producen más fotosintatos, que son usados por un crecimiento en aumento (adaptado de Higginbotham *et al.*, 1985).

3.4.4 Modificando el Dióxido de Carbono en los Viveros Forestales que Producen en Contenedores

El primer aspecto a evaluar cuando se considera suplementar CO₂, es el tipo de vivero. Obviamente, no hay potencial para la suplementación en viveros abiertos, mientras que en las estructuras cerradas el aumento racional en los niveles de CO₂ dependerá del tipo de estructura. El enriquecimiento es menos económico en estructuras que no están bien selladas, como son las estructuras de protección en comparación con los invernaderos perfectamente cerrados. Las construcciones cubiertas con una doble capa de polietileno son ideales, pues tienen pocas salidas de aire, en comparación con aquellas cubiertas de vidrio, fibra de vidrio, o paneles plásticos (Nelson, 1985).

3.4.4.1 Aumentando la disponibilidad de dióxido de carbono con la ventilación

Una buena circulación de aire es necesaria para hacer el CO₂ disponible en la superficie foliar. Por lo tanto, los viveristas pueden estimular el crecimiento de las plantas meramente promoviendo una buena ventilación. Cuando el aire está estancado, la concentración de CO₂ en la capa de frontera alrededor de la planta puede ser considerablemente menor que en condiciones ambientales fuera del invernadero, de modo que al aumentar el flujo de aire sobre las hojas, se hace al gas más disponible para la fotosíntesis (Kramer y Kozlowski, 1979; Hicklenton, 1988). En estudios de campo con un cultivo, Gaastra (1963) demostró que el aumentar la velocidad del viento sobre la superficie foliar puede incrementar significativamente la fotosíntesis (Cuadro 3.4.2). En un invernadero, un flujo de aire de 50 cm/s (99 pies por minuto), que es rápido pero factible, se ha encontrado equivalente a un enriquecimiento de 50% en los niveles de CO₂. No obstante, el potencial para incrementar la ventilación es limitado por la máxima velocidad de ventilación, alrededor de 42 cm/s (83 pies por minuto) en un invernadero totalmente cerrado (Hanan *et al.*, 1978).

Ya que los nuevos invernaderos eficientes en energía son mucho más herméticos que los viejos, los viveristas no pueden depender más de las corrientes de aire para reemplazar el CO₂. Los viveristas con áreas de protección deberían estimular la fotosíntesis levantando los lados, siempre que la temperatura del aire lo permita, y aquellos con estructuras deberían usar sistemas de ventilación con ventiladores, que promuevan una buena mezcla de aire en el invernadero. Aún en días en los que la temperatura exterior es baja, puede ser provechoso proporcionar aire del exterior y calentarlo, especialmente temprano en la mañana, cuando las tasas fotosintéticas son las mayores (La ventilación es discutida con más detalle en la sección 3.1.4.3. de este manual).

3.4.4.2 Complementando los niveles de dióxido de carbono

El potencial del enriquecimiento con CO₂ ha sido demostrado en estudios en cámaras de cultivo, donde el crecimiento de las plantas de especies forestales ha sido aumentado de 50 a 100% (Tinus, 1972, 1976). En un invernadero totalmente cerrado, la respuesta será algo menor, pues es necesario ventilar cuando las temperaturas exceden los niveles óptimos, y se hace imposible mantener los niveles de CO₂ superiores a los del aire del exterior. El tipo de estructura de cultivo es también importante; las estructuras corrientes tienen ocho veces la tasa de intercambio de aire, en comparación con los invernaderos bien sellados (Hicklenton, 1988). Por tanto, la factibilidad de enriquecimiento con CO₂ dependerá del tipo y de la condición de la estructura de cultivo, y de la porción de tiempo que las ventanas se mantengan cerradas.

Fuentes de dióxido de carbono. El uso de materia orgánica en descomposición, especialmente estiércol, para calentar los invernaderos y estructuras frías, incidentalmente proporciona CO₂ suplementario (Haberle *et al.*, 1986). La materia orgánica liberará 1.4 veces su peso en CO₂ (Hanan *et al.*, 1986). Aunque estos

materiales son baratos y están relativamente disponibles, rara vez son empleados en las instalaciones modernas de vivero, debido a los problemas sanitarios y de eliminación que representan. Otra seria desventaja es la imposibilidad para controlar la tasa de descomposición, y por tanto la concentración de CO₂ en el invernadero. No obstante, el potencial ha sido demostrado para viveros forestales, pues las plantas de *Abies concolor* (Gold & Glend.) Lindl. ex Hildbr. sobre un mulch de materia orgánica, resultaron significativamente más altas que las plantas testigo (Montano *et al.*, 1977). Hicklenton (1988) proporciona una buena discusión de las posibles aplicaciones para el suplemento de CO₂ a través de la descomposición controlada.

En los viveros forestales modernos que producen en contenedores, se tienen dos opciones realistas para suplementar CO₂: inyección de CO₂ puro, y combustión de combustibles de carbón.

Dióxido de carbono puro. El método más seguro para suplementar CO₂ en los invernaderos, es inyectarlo puro desde tanques, en su estado líquido presurizado (Hicklenton, 1988). El gas presurizado es distribuido a lo largo del invernadero mediante tubería perforada. Hanan *et al.* (1989) estimaron un uso promedio de CO₂ de 10 a 26 Kg/m² (2 a 5 libras por pie cuadrado) de espacio de invernadero para cultivos de flores. Aunque efectivo, la mayor desventaja de este método es lo caro que resulta. Sin embargo, en años recientes los elevados costos y el futuro incierto de los combustibles fósiles, han hecho a la opción del CO₂ puro más atractiva desde un punto de vista económico (Nelson, 1985).

Combustión de combustibles de carbón. La combustión completa de cualquier compuesto con carbono producirá CO₂. El keroseno fue el primer combustible que fue usado en invernaderos para la generación de CO₂, aunque su costo y problemas relacionados con la fitotoxicidad del dióxido de azufre que también produce, le han hecho impopular en muchas partes del mundo. El propano y el gas

natural, comúnmente son utilizados en invernaderos comerciales, y la diferencia está relacionada primariamente con costo y disponibilidad. Ambas fuentes son lo suficientemente puras, de modo que son consideradas generalmente la fuente más económica para la generación de CO₂.

Los generadores de dióxido de carbono que queman propano o gas natural están disponibles comercialmente (Fig. 3.4.7). La tasa de producción de CO₂ está controlada por la modulación del quemador, y aproximadamente 15 quemadores por hectárea (66 por acre) deberían generar 1,000 ppm de CO₂ en un invernadero bien sellado. El consumo de gas de estos generadores es muy bajo, de 2 m³/h (70 pies cúbicos por hora) (Hicklenton, 1988). La combustión completa del gas natural y del propano, requiere de una oxigenación adecuada, y produce CO₂ y agua; el propano produce proporcionalmente menos agua que el gas natural (Sheldrake, 1964). El quemador agrega una cantidad considerable de calor; de 4,000 a 5,000 Kcal/Kg (8,000 a 10,000 Btu por libra) de combustible, dependiendo del tipo de combustibles y de la eficiencia del quemador. Si el calor excesivo representa un problema, los quemadores pueden ser localizados en el exterior del invernadero, y el gas puede ser bombeado hacia el interior.

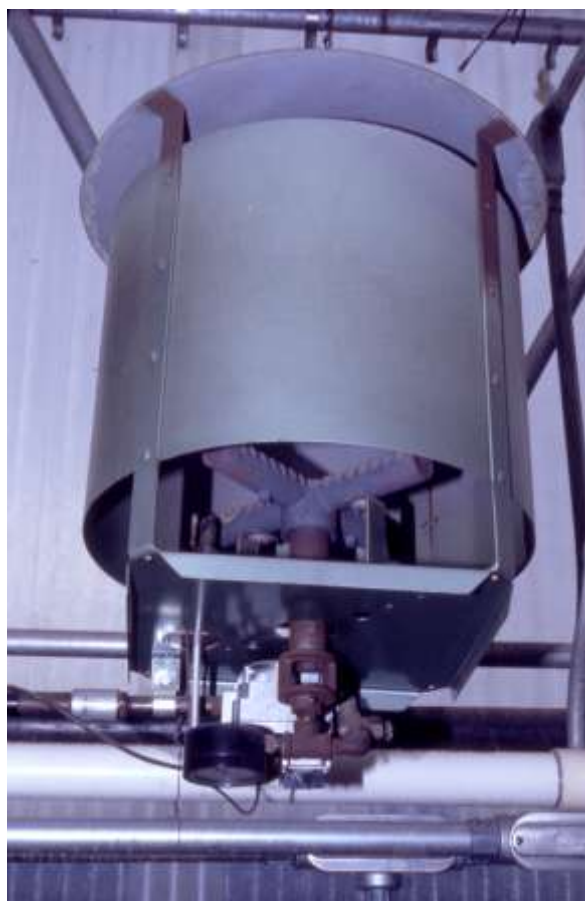
La principal desventaja de estos generadores de CO₂ son las fugas o la combustión incompleta, que pueden liberar gases fitotóxicos hacia dentro del invernadero. El propano, que contiene una cantidad significativa de propileno, representa más de un problema, porque el propileno es capaz de producir un daño similar al del etileno (Abeles, 1973). El gas natural es principalmente una mezcla de metano, etano y propano, pero éste también puede contener contaminantes potencialmente peligrosos, como el sulfuro de hidrógeno, el propileno y el etileno, pero a niveles que generalmente son muy bajos para causar problemas. La flama de quema debería siempre ser ajustada a un color azul; las trazas de color amarillo indican combustión incompleta, que puede liberar gases tóxicos al ambiente del invernadero (Hicklenton, 1988).

El monóxido de carbono es peligroso para el ser humano y para las plantas, y el etileno es una potente hormona en las plantas que promueve la dormancia y la abscisión de la hoja (Abeles, 1973).

El tubo de escape de gases de los sistemas de calentamiento en los invernaderos, que usan propano o gas natural, es otra fuente potencial de CO₂, pero éstos solamente están disponibles cuando los sistemas de calentamiento son requeridos. El gas de chimeneas de industrias o plantas generadoras de electricidad, también contiene CO₂ de desecho, así como las fábricas de fertilizantes, y algunas plantas procesadoras de alimentos. Lo prácticas que sean estas fuentes depende de la localización del invernadero. El mayor beneficio es que éstas son esencialmente gratuitas, y hay también el potencial para la utilización del calor de desecho de la fuente. Los gases de desecho representan los mismos problemas potenciales que el propano o el gas natural, y la combustión incompleta es más común y más difícil de detectar que con las flamas de los generadores de CO₂, fácilmente visibles (Hicklenton, 1988).

Diseñando un sistema de enriquecimiento de dióxido de carbono. Sólo es práctico suplementar CO₂ en invernaderos bien sellados. Aunque piense que el polietileno es permeable al CO₂, los invernaderos cubiertos con una película de polietileno son muy herméticos, en comparación con las estructuras de vidrio o de fibra de vidrio.

Calculando los requerimientos de dióxido de carbono. La cantidad de CO₂ a suplementar, depende de la cantidad usada per el cultivo, más las fugas del invernadero. Cálculos específicos para determinar el tamaño apropiado de un generador, para un tamaño y tipo dados de invernadero, pueden ser consultados en Aldrich y Bartok (1989), pero el Cuadro 3.4.3 proporciona un ejemplo típico. Los cálculos para el uso de combustible y la cantidad de calor generada, también son descritos en la misma referencia.



A



B



C

Figura 3.4.7 los generadores de dióxido de carbono queman propano o gas natural y producen calor y vapor de agua además del CO₂ (A). Algunos modelos (B) contienen ventiladores para incrementar la distribución de CO₂ en el invernadero. Si el generador por sí mismo no puede tener un ventilador, resulta benéfica la operación de un sistema de circulación de aire, como un ventilador a propulsión (C).

Distribución dentro del invernadero. Una vez que el generador de CO₂ ha sido instalado, es necesario mezclar el gas con el aire del invernadero para proporcionar una concentración uniforme a nivel del cultivo. Esto no debería ser un problema durante los días fríos, cuando los sistemas de calentamiento crean corrientes convectivas normales, pero Hicklenton (1988) refiere que los niveles de CO₂ son típicamente mayores en la vecindad inmediata del generador. Los generadores de dióxido de carbono deberían ser montados teniendo en mente la circulación del aire, y la seguridad ante posibles incendios (Fig. 3.4.7C). Algunas marcas contienen ventiladores para asegurar que el CO₂ sea distribuido horizontalmente a través del invernadero (Fig. 3.4.7B). Los sistemas verticales especiales de ventiladores, pueden ser usados para movilizar el CO₂ hacia abajo, a nivel del cultivo.

Si el CO₂ puro es inyectado de una fuente puntual, éste debe ser distribuido a través del invernadero. Algunos viveristas utilizan ventiladores para provocar un flujo horizontal; otros distribuyen el gas presurizado a través de una tubería finamente instalada a lo largo del invernadero, al ras del cultivo. Hicklenton (1988) discute algunas aplicaciones comunes del inyectado de CO₂ puro en invernaderos hortícolas.

Problemas potenciales con los sistemas de combustión. A causa de un mal diseño o un mal mantenimiento en los quemadores de CO₂, varios gases peligrosos pueden ser producidos (Cuadro 3.4.4).

Ciertos compuestos, como el monóxido de carbono y el etileno, son producidos por la combustión incompleta (Scarrat, 1985). Los dióxidos de azufre resultan de la quema de combustibles con elevadas cantidades de azufre. Los siguientes combustibles fueron sugeridos para la generación de CO₂, por su bajo contenido de azufre (Kretchman y Howlett, 1970): propano, 0.01% de azufre; gas natural, 0.02% de azufre; y keroseno, 0.02% de azufre.

Una buena forma de asegurar la combustión completa, es proporcionar una fuente directa de aire exterior al quemador. Una entrada de aire de 1 cm por cada 80 Kcal (1 pulgada cuadrada por cada 2,000 Btu) de capacidad del quemador, debería proporcionar suficiente aire para una combustión completa. El quemador debería ser ajustado apropiadamente. Si la flama es amarilla, y especialmente si ésta es humeante, puede producir productos dañinos de la combustión parcial; si la flama es corta y muy turbulenta, algún gas está escapando al invernadero sin ser quemado. Para una mayor discusión sobre los contaminantes generados en la combustión, que pueden ser producidos por generadores de CO₂, ver Hicklenton (1988) y Hand (1906).

Cuadro 3.4.3 Cálculos para el diseño de un sistema de enriquecimiento de CO₂ para invernaderos.

Supuestos:

Capa doble de polietileno como cubierta de invernadero (Largo x Ancho x Alto)
= 58.5m X 29.2m X 2.7m (192 ft X 96 ft X 9 ft) =

Fugas de aire
= 0.5 cambios de aire por hora

Nivel de CO₂ objetivo
= 300 ppm

Tasa de uso de las plantas
= 0.0009 m de CO₂ por hora por m² de cultivo (0.003 ft² de CO₂/h/ft²)

Paso 1. Determine el uso de las plantas en el invernadero

Uso por plantas = tasa de uso por plantas x área de invernadero

Uso por plantas = 0.0009 m³/h/m² X 1,708 m²

Uso por plantas = 1.5m³ de CO₂/h (55 ft³ de CO₂/h)

Paso 2. Determine la pérdida por fuga del invernadero

Pérdida = volumen del invernadero X cambios de aire por hora X 0.000001 X (nivel objetivo de CO₂ - nivel ambiente)

Pérdida = 4,610 m³ X 0.5 X 0.0000001 X 700

Pérdida = 1.6 m³ de CO₂/h (58 ft³ de CO₂/h)

Paso 3. Calcule el requerimiento de CO₂

Requerimiento de CO₂ = Uso de la planta + pérdida por fuga

Requerimiento de CO₂ = 1.5 m³ de CO₂/h + 1.6 m³ de CO₂/h

Requerimiento de CO₂ = 3.1 m³ de CO₂/h (113 ft³ de CO₂/h)

Fuente: Aldrich y Bartok (1989)

Cuadro 3.4.4 Contaminantes químicos producidos por la generación de dióxido de carbono.

Contaminante (símbolo químico)	Máxima concentración permitida (ppm)
Monóxido de carbono (CO)	500
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	20
Amonio (NH ₃)	10
Formaldehido (NCHD)	0.7
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.2
Ozono (O ₃)	0.2
Etileno (C ₂ H ₄)	0.05

Compilado de varias fuentes

3.4.5 Sistemas Monitoreo y Control de Dióxido de Carbono

3.4.5.1 Midiendo los niveles de dióxido de carbono

Una vez que los generadores han sido ajustados para producir los niveles deseados, en la mayor parte de los viveros no se monitorean los niveles de CO₂ continuamente, aunque se verifican ocasionalmente. Unos pequeños monitores que son bombas de CO₂ manuales, con una exactitud razonable, están disponibles por alrededor de U.S. \$200; el aire es bombeado a través de un tubo de vidrio que contiene un producto químico sensible al CO₂, y que cambia de color cuando el aire es empujado a través de éste (Pallas, 1986) (Fig. 3.4.8A).

Un monitor más sofisticado y caro (U.S. \$1,400), el analizador infrarrojo de gas es popular a causa de su precisión y exactitud (Fig. 3.4.8B). Estos analizadores pueden medir el CO₂ continuamente, y pueden conectarse directamente con un sistema computarizado ambiental (Fallas, 1986). Los viveros que no tiene analizadores infrarrojos de gas, deben ser capaces de obtener muestras para ser probadas en alguna universidad o estación de investigación agrícola cercanas. Las muestras pueden ser tomadas mediante el llenado de una cámara limpia con aire del invernadero, usando una bomba para inflado de llantas de bicicleta para el efecto. El butil de caucho es altamente impermeable al CO₂, y tales muestras deberían permanecer en buena condición durante días. No use bolsas de plástico, a menos que las muestras puedan ser analizadas en cuestión de minutos. Esté seguro de que no se mezclen las exhalaciones de la respiración con la muestra.





A
B
Figura 3.4.8 Probadores de CO₂ tipo bomba manual (A), operados mediante el forzado de aire a través de un tubo de vidrio que está lleno de reactivos químicos. La concentración de CO₂ es medida por la magnitud del cambio de color bajo el tubo. Analizadores infrarrojos de gas, más sofisticados y caros, monitorean con precisión los niveles de CO₂ y proporcionan una retroalimentación constante a los generadores (B).

3.4.5.2 Sistemas de control de dióxido de carbono

Un sistema de control de CO₂ simple y barato, usa una fotocelda o un reloj que se conecta con el termostato que controla la primera etapa de enfriamiento. El generador se prende al amanecer, o aproximadamente una hora antes de éste, promoviendo la concentración de CO₂ dentro del intervalo óptimo al momento de la apertura estomatal y la fotosíntesis comienza. El generador se mantiene prendido hasta que se requiere el enfriamiento. Cuando las ventilas abren y los ventiladores se prenden, los elevados niveles de CO₂ no pueden ser mantenidos más, y el termostato apaga el generador. El sistema puede ser activado de nuevo por la tarde, cuando la ventilación para enfriamiento cesa. Normalmente, el reloj

puede apagar el generador aproximadamente media hora antes del ocaso.

Con estos sistemas, el generador puede estar prendido todo el día en el invierno; pero durante las estaciones cálidas, usualmente es posible aumentar el nivel de CO₂ solamente por unas pocas horas, temprano en la mañana y de nuevo en la tarde. Este periodo relativamente corto con CO₂ suplementario aún resulta efectivo, porque los estomas típicamente se cierran durante el medio día, a causa de la tensión hídrica normal, aunque las plantas estén bien hidratadas. Bajo tales condiciones, la fotosíntesis es más rápida temprano en la mañana, y alcanza un pico secundario avanzada la tarde. En adición, el CO₂ extra mantendrá a los estomas parcialmente cerrados, lo que retrasará la tensión hídrica de medio día, y quizá prevenga la baja en la fotosíntesis (Pettibone *et al.*, 1970).

La mejor manera de controlar la concentración de CO₂, es mediante el uso de un sistema automático de retroalimentación, que mida continuamente la concentración de CO₂ y lo agregue cuando sea necesario. Muchos sistemas de control microcomputarizados, usan analizadores infrarrojos de gas, y un sistema de válvulas selenoides para regular la concentración de CO₂ en el invernadero dentro de las 100 ppm. Estos sistemas son caros (U.S. \$3,000 a 10,000), pero los modelos nuevos son durables y tienen un récord probado en invernaderos operativos. Pallas (1986) y Hicklenton (1988) proporcionan una revisión excelente de las mediciones y sistemas de control de CO₂ así como de los proveedores.

3.2.6 Conclusiones y Recomendaciones

El dióxido de carbono, comúnmente es el mayor factor limitativo para la fotosíntesis en el ambiente natural, y esta situación es exacerbada en los invernaderos, donde la circulación de aire se restringe, especialmente en tiempo frío, cuando las ventilas están cerradas. Aunque los niveles de CO₂ normalmente no son manejados en la mayor parte de los viveros forestales que producen en contenedores, numerosas investigaciones han demostrado los beneficios de hacerlo.

Los viveristas pueden asegurar que sus cultivos tengan suficiente CO₂ en dos formas: primero, promoviendo una adecuada ventilación durante los periodos en que la fotosíntesis es mayor, y segundo, proporcionándolo directamente. Los invernaderos totalmente controlados deberían proporcionar niveles de CO₂ de 1,000 ppm, y aún los viveristas con estructuras de cultivo semicontroladas, pueden aumentar la fotosíntesis y el crecimiento mediante la promoción de un buen intercambio de aire durante el tiempo frío, especialmente durante las horas de la mañana. Los viveros que tienen cultivos durante los meses de invierno, están particularmente bien adaptados para la suplementación de CO₂, especialmente a elevadas latitudes, donde el alumbrado fotosintético complementario es también empleado.

Se ha demostrado que el enriquecimiento con dióxido de carbono incrementa la tasa de crecimiento de muchas plántulas de especies forestales, pero la variación entre especies es de esperarse. El aumento de los niveles de CO₂ dará los mejores resultados temprano en la estación de crecimiento, y puede resultar aún útil durante la fase de establecimiento. Debido a que puede inhibir la dormancia y la rusticidad al frío, la suplementación con CO₂ debería ser cesada al comienzo de la fase de endurecimiento. Las elevadas tasas de crecimiento de las plántulas que se experimentan, originarán un aumento en la demanda de nutrimentos minerales y agua, así que los viveristas deben ajustar sus programas de fertilización y de riego cuando se utiliza CO₂ suplementario.

Del mismo modo, los árboles cultivados bajo elevados niveles de CO₂ pueden tolerar mayores temperaturas, y beneficiarse de elevadas intensidades luminosas. Pueden esperarse rotaciones de cultivo cortas.

Lo práctico y la economía del enriquecimiento con CO₂ deben ser calculados para cada vivero individual que produce en contenedores, pero considerando que los costos anuales de operación son de solamente U.S. \$1 a U.S. \$2 por m² (U.S. \$0.10 a U.S. \$0.15 por ft²), más viveristas deberían considerar esta práctica de cultivo (Freeman, 1985).

3.2.7 Literatura Citada

- Abeles, F.B. 1973. Ethylene in plant biology. New York: Academic Press. 302 p.
- Aldrich, R.A.; Bartok, J.W. Jr. 1989. Greenhouse engineering. Publ. NRAES-33. Ithaca, NY: Cornell University, Northeast Regional Agricultural Engineering Service. 203 p.
- Bauerle, W. L.; Kretchman, D.; Tucker-Kelly, L. 1986. CO₂ enrichment in the U.S. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops, vol. 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 49-57.
- Blackman, F.F. 1905. Optima and limiting factors. *Annals of Botany* 19:281.
- Brown, K.; Higginbotham, K.O. 1986. Effects of carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth of boreal tree seedlings. *Tree Physiology* 2(1-3):223-232.
- Campagna, M.A.; Margolis, H. A. 1989. Influence of short-term atmospheric CO₂ enrichment on growth, allocation patterns, and biochemistry of black spruce seedlings at different stages of development. *Canadian Journal of Forest Research* 19(6):773-782).
- Chang, J. 1968. Climate and agriculture: an ecological survey. Chicago: Aldine Publishing Co. 304 p.
- Conroy, J.; Barloes, E.W.R.; Bevege, D.I. 1986. Response of *Pinus radiata* seedlings to carbon dioxide enrichment at different levels of water and phosphorus: growth, morphology and anatomy. *Annals of Botany* 57:165-177.
- Freeman, R. 1985. The importance of carbon dioxide. In: Ball, V., ed. Ball Red Book, 14th ed. Reston, VA: Reston Publishing Company; 181-193.
- Gaastra, P. 1963. Climatic control of photosynthesis and respiration. In: Evans, L.T., ed. Environmental control of plant growth. New York: Academic Press: 113-140.
- Hanan, J.J.; Holley, W.D.; Goldsberry, K. L. 1978. Greenhouse management. Berlin: Springer-Verlag. 530 p.
- Hand, D.W. 1986. CO₂ sources and problems in burning hydrocarbon fuels for CO₂ enrichment. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. 1986. Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops, Vol 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 99- 121.
- Hartmann, H.T.; Flocker, W.J.; Kofranek, A.M. 1981. Plant science: growth, development, and utilization of cultivated plants. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 676 p.
- Hicklenton, P.R. 1988. CO₂ enrichment in the greenhouse: principles and practice. Portland, OR: Timber Press. 58 p.
- Higginbotham, K.O.; Mayo, J.M.; L'Hirondelle, S.; Krystofiak, D.K. 1985. Physiological ecology of lodgepole pine (*Pinus contorta*) in an enriched CO₂ environment. *Canadian Journal of Forest Research* 15:417-421.
- Holley, W.D. 1965. The CO₂ story. In; Ball Red Book, 11th ed. West Chicago, IL: George J. Ball, Inc.: 94-119.
- Kramer, P.J.; Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. New York: Academic Press. 811 p.
- Kretchman, D.W., Howlett, R.S., 1970. CO₂ enrichment for vegetables. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 13(2):252-256.
- Ludlow, M.M.; Jarvis, P.G. 1971. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). I. General Characteristics. *Journal of Applied Ecology* 8:925-953.
- Luxmoore, R.J.; O'Neill, E.G.; Ells, J.M.; Rogers, H.H. 1986. Nutrient uptake and growth responses of Virginia pine to elevated atmospheric carbon dioxide. *Journal of Environmental Quality* 15(3):244-251.

- Margolis, H.A.; Vezina, L. 1990. Atmospheric CO₂ enrichment and the development of frost hardiness in containerized black spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 20(9):1392- 1398.
- Montano, J.M.; Fisher, J.T.; Cotter, D.J. 1977. Sawdust for growing containerized forest tree seedlings. *Tree Planter's Notes* 28(2):6-9.
- Mousseau, M.; Enoch, H.Z. 1989. Carbon dioxide enrichment reduces shoot growth in sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa* Mill.). *Plant, Cell and Environment* 12(9):927-934.
- Nelson, P.V. 1985. *Greenhouse operation and management*, 3rd. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 598 p.
- Pallas, J.E., Jr. 1986. CO₂ measurement and control. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops*, vol. 1, status and CO₂ sources. Boca Raton, FL: CRC Press: 77-98.
- Pearcy, R.W.; Bjorman, O.; Caldwell, M.M.; Keeley, J.E.; Monson, R.K.; Strain, B.R., 1987. Carbon gain by plants in natural environments: carbon assimilation analysis provides an understanding of how plants function in diverse environments. *BioScience* 37(1):21-29.
- Pettibone, C.A.; Matson, W.R.; Pfeiffer, C.L.; *et al.* 1970. The control and effects of supplemental CO₂ in air-supported plastic greenhouses. *Transactions of American Society of Agricultural-Engineers* 13(2):259-62,268.
- Scarratt, J.B. 1985. Greenhouse managers: beware combustion fumes in container greenhouses. *Forestry Chronicle* 61 (4):308-311.
- Sheldrake, R. 1964. CO₂ and ventilation. *American Vegetable Grower* 12:30.
- Sionit, N.; Kramer, P.J. 1986. Woody plant reactions to CO₂ enrichment. In: Enoch, H.Z.; Kimball, B.A., eds. *Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops*. vol. 2., physiology, yield, and economics. Boca Raton, FL: CRC Press: 69-85.
- Surano, K.A.; Daley, P.F.; Houppis, J.L.J.; Shinn, J.H.; Helms, J.A.; Palassou, R.J.; Costella, M.P. 1986. Growth and physiological responses of *Pinus ponderosa* Dougl. ex P. Lawes. to long-term elevated CO₂ concentrations. *Tree Physiology* 2(1-3): 243-259.
- Tinus, R.W. 1972. Carbon dioxide enriched atmosphere speeds growth of ponderosa pine and blue spruce seedlings. *Tree Planter's Notes* 23(1):12-15.
- Tinus, R.W. 1975. Impact of the CO₂ requirement on plant water use. Stone, J.F., ed. *Plant modification for more efficient water use*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing. 320 p.
- Tinus, R.W. 1976. Photoperiod and atmosphere CO₂ interact to control black walnut (*Juglans nigra* L.) seedling growth. *Plant Physiology* 57(5) (Suppl.): Abstr. 554.
- Tolley, L.C. 1982. The effects of atmospheric carbon dioxide enrichment, irradiance, and water stress on seedling growth and physiology of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* PhD dissertation. Durham, NC: Duke University.
- Tolley, L.C.; Strain, B.R., 1984. Effects of CO₂ enrichment on growth of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings under different irradiance levels. *Canadian Journal of Forestry Research* 14:343-350.
- Yeatman, C.W. 1970. CO₂ enriched air increased growth of conifer seedlings. *Forestry Chronicle* 46-229-230.

Apéndice

Cuadro A.1. Factores de conversión para un intervalo de temperaturas típicas en viveros que producen en contenedores (Grados Celsius a Grados Fahrenheit).

Celsius a Farenheit (°C X 9/5) + 32 = °F							
°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
100	212	64	147	28	82	-8	18
98	208	62	144	26	79	-10	14
96	205	60	140	24	75	-12	10
94	201	58	136	22	72	-14	7
92	198	56	133	20	68	-16	3
90	194	54	129	18	64	-18	0
88	190	52	126	16	61	-20	-4
86	187	50	122	14	57	-22	-8
84	183	48	118	12	54	-24	-11
82	180	46	115	10	50	-26	-15
80	176	44	111	8	46	-28	-18
78	172	42	108	6	43	-30	-22
76	169	40	104	4	39	-32	-26
74	165	38	100	2	36	-34	-29
72	162	36	97	0	32	-36	-33
70	158	34	93	-2	28	-38	-36
68	154	32	90	-4	25	-40	-40
66	151	30	86	-6	21	-26	-15

Cuadro A.2. Factores de conversión para un intervalo de temperaturas típicas en viveros que producen en contenedores (Grados Fahrenheit a Grados Celsius).

Farenheit a Celsius (°F - 32) X 5/9 = °C							
°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C
212	100	148	64	84	29	20	-7
210	99	146	63	82	28	18	-8
208	98	144	62	80	27	16	-9
206	97	142	61	78	26	14	-10
204	96	140	60	76	24	12	-11
202	94	138	59	74	23	10	-12
200	93	136	58	72	22	8	-13
198	92	134	57	70	21	6	-14
196	91	132	56	68	20	4	-16
194	90	130	54	66	19	2	-17
192	89	128	53	64	18	0	-18
190	88	126	52	62	17	-2	-19
188	87	124	51	60	16	-4	-20
186	86	122	50	58	14	-6	-21
184	84	120	49	56	13	-8	-22
182	83	118	48	54	12	-10	-23
180	82	116	47	52	11	-12	-24
178	81	114	46	50	10	-14	-26
176	80	112	44	48	9	-16	-27
174	79	110	43	46	8	-18	-28
172	78	108	42	44	7	-20	-29

170	77	106	41	42	6	-22	-30
168	76	104	40	40	4	-24	-31
166	74	102	39	38	3	-26	-32
164	73	100	38	36	2	-28	-33
162	72	98	37	34	1	-30	-34
160	71	96	36	32	0	-32	-36
158	70	94	34	30	-1	-34	-37
156	69	92	33	28	-2	-36	-38
154	68	90	32	26	-3	-38	-39
152	67	88	31	24	-4	-40	-40
150	66	86	30	22	-6		