

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TIPO REMOLQUE PARA DESINFECCIÓN EN ESTÁTICO CON CALOR DE SUSTRATOS AGRÍCOLAS

## DESIGN-BUILD OF A TRAILER TYPE EQUIPMENT FOR DISINFECTION IN STATIC AGRICULTURAL SUBSTRATES USING HEAT

Chávez Aguilera Noel<sup>1\*</sup>; Romantchik Kriuchkova Eugenio<sup>1</sup>; Gracia López Carlos<sup>2</sup>;  
Velázquez Borja Martí<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera, México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO.

<sup>2</sup>Departamento de Mecanización Agraria, de la Universidad Politécnica de Valencia, España.  
Correo-e: noelcha1@yohoo.com.mx (\*Autor responsable)

### RESUMEN

Esta investigación se realizó en el Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2006. Actualmente la erradicación de patógenos de las plantas se hace con fumigantes químicos. La utilización generalizada de los métodos químicos ha ocasionado problemas ambientales, en la salud y en la sostenibilidad de los suelos y sustratos agrícolas. El empleo de métodos físicos, para este fin, principalmente en invernaderos, aparece como una buena alternativa, ya que se pretende eliminar todo residuo químico de la aplicación. En este estudio se diseñó y construyó un equipo tipo remolque para desinfección en estático de suelos y sustratos agrícolas con vapor de agua-aireado y con aire caliente. Para su construcción se utilizaron lámina de acero inoxidable y PTR, y se automatizó el control de aplicación de calor y temperatura. Para un suelo franco arenoso: con vapor de agua-aireado el tiempo requerido para incrementar la temperatura de 21 °C a 71 °C fue de 15 minutos, y con aire caliente fue de 3.5 horas. Con ambos procedimientos se mantiene la temperatura entre 71-72 °C por tiempo indefinido. Con vapor de agua-aireado tiene una productividad de 487.2 L·h<sup>-1</sup>, y con aire caliente de 121.8 L·h<sup>-1</sup>.

**Palabras clave adicionales:** tecnología, pasteurización, métodos térmicos, agricultura protegida.

### ABSTRACT

This research was performed in the Agricultural Department of Mechanical Engineering from the Universidad Autónoma Chapingo in the year 2006. Currently the eradication of plant pathogens is done with chemical fumigants. The widespread use of chemical methods has caused environmental problems, health and sustainability of agricultural soils and substrates. The use of physical methods, mainly in greenhouses, for this purpose appears to be a good alternative as it is intended to eliminate any chemical residue from the application. This study was designed and built a trailer type equipment for disinfection in static agricultural soils with steam-aerated and heated air. For its construction was used stainless steel sheet and PTR, the heat and temperature control was automated. For a sandy loam soil: steam-aerated the time required to increase the temperature of 21 °C to 71 °C was 15 minutes and hot air was 3.5 hours. With both procedures keeping the temperature between 71-72 °C indefinitely. With steam-aerated water has a productivity of 487.2 L·h<sup>-1</sup>, and with hot air from 121.8 L·h<sup>-1</sup>.

**Additional key words:** technology, pasteurization, thermal methods, protected agriculture.

## INTRODUCCIÓN

El suelo contiene una gran cantidad y variedad de organismos que encuentran en él condiciones de vida favorables. A esta fase biótica del terreno pertenecen hongos, bacterias, nemátodos, artrópodos, etc. Algunos de ellos tienen actividad parasitaria en los cultivos y pueden causar importantes pérdidas, tanto en cantidad como en calidad, a las producciones agrícolas (Brady y Weil, 1999).

Este problema es de vital importancia en la agricultura moderna, donde se tiende, en muchas ocasiones, al monocultivo intensivo, sobre todo bajo invernadero, y donde se prevén condiciones ambientales particulares (humedad relativa, temperatura, etc.) que resultan muy favorables para el desarrollo de algunos patógenos (Velázquez *et al.*, 2003).

Estos agentes patógenos pueden actuar sobre las plantas en diversas fases de su desarrollo, como semillas semigerminadas, plantas en emergencia, raíces, cuello y partes aéreas en contacto con el suelo infectado. En algún caso, la presencia de estos patógenos puede llevar a la completa inhabilitación del suelo para determinados cultivos, obligando al agricultor a utilizar medios más o menos drásticos de desinfección del terreno.

La búsqueda de soluciones a la infección de suelos y sustratos anteriormente cultivados ha llevado a desarrollar diversos métodos de desinfección. Desde un punto de vista económico, esto se traduce en una disminución del riesgo de pérdidas cuantitativas y cualitativas en los cultivos.

Debido a su alta efectividad, los métodos más utilizados en los últimos 50 años han sido los fumigantes químicos, principalmente el bromuro de metilo. La utilización generalizada de los métodos químicos ha ocasionado una serie de problemas ambientales, en la salud y en la sostenibilidad del suelo agrícola. La búsqueda de alternativas a los tratamientos químicos para la eliminación de microorganismos perjudiciales y las malas hierbas existentes en el suelo supone un reto importante para la investigación agrícola, ya que en ocasiones quedan residuos contaminantes en el suelo, a veces peligrosos para la salud, que pueden ser de elevada persistencia (Castro, 1964; Gehring, 1991).

La utilización de métodos físicos para este fin aparece como una buena alternativa, ya que se pretende eliminar todo residuo químico de la aplicación. Estos se clasifican en térmicos, mecánicos y eléctricos (Gehring, 1991).

Los métodos físicos de control térmico son aquellos que generan un aumento en la temperatura de los organismos al aplicarles calor, aumento que conlleva su eliminación. Estos métodos empezaron a estudiarse en los años 1930, al descubrirse que con el calor las proteínas de los organismos se coagulan y se inactivaban las enzimas (Newhall, 1955, citado por Velázquez *et al.*, 2003). Pero realmente el desarrollo de los tratamientos con calor se produce en los años 1950, cuando diversos trabajos determinan los puntos térmicos letales de patógenos, nemátodos,

insectos y virus. (Baker, 1962; Nelson 1998; Velázquez *et al.*, 2003).

Los métodos térmicos más estudiados en campo abierto han sido la solarización, la llama directa y la utilización de vapor de agua. Cada uno de estos métodos presenta inconvenientes que han impedido su uso generalizado. En ocasiones ha sido la falta de eficiencia; otras, la baja rentabilidad o capacidad de trabajo. Esto no es así en el tratamiento de sustratos en invernadero, donde las condiciones están más controladas. Actualmente el método térmico más empleado en la desinfección de sustratos en invernadero es la aplicación de vapor de agua, y recientemente la aplicación de vapor de agua-aireado y aire caliente (Langhans, 1994; Nelson, 1998; Runia, 2000; Velázquez *et al.*, 2003).

El mejor nivel de humedad que debe tener el suelo o el sustrato para pasteurizarlo es el nivel de humedad adecuado para el cultivo, es decir, cerca de la capacidad de campo para el suelo y cerca de la capacidad del contenedor para el sustrato (Bartok, 1994; Nelson, 1998).

La temperatura necesaria para erradicar del suelo los patógenos y las semillas de malas hierbas, depende de la temperatura del punto de muerte térmica de cada patógeno y semilla de mala hierba, y el tiempo de aplicación de calor depende del método utilizado (Gracia y Martín Portugués, 1983; Langhans, 1990; Bartok, 1994; Burés, 1997). Así, para erradicar los patógenos del suelo y sustratos se recomienda mantener una temperatura de 70 °C (Runia, 2000; EPA, 2002), 71 °C (Nelson, 1998) por 30 minutos; por experiencia, otras temperaturas recomendadas son de 80 °C (Langhans, 1990), 82 °C (French y Hebert, 1997) por 30 minutos, y para erradicar virus la temperatura debe mantenerse entre 85 y 100 °C (Runia, 2000).

### Aplicación de vapor de agua.

En este método, el material a desinfectar, previamente acumulado, se cubre con un toldo plástico y luego se le introduce el vapor, para lo cual se utilizan lanzas acopladas a calderas de elevada potencia. Es necesario esperar varias horas para completar la desinfección.

**Principio.** Cuando se aplica vapor de agua al suelo y sustratos agrícolas, se forma una banda de condensación sobre la cual, en el lado donde se encuentra el vapor de agua, la temperatura es de 100 °C y por el otro lado es la temperatura inicial del suelo o del sustrato: 21 °C (Langhans, 1990). Cuando el vapor de agua sale de la caldera lo hace bajo ligera presión, 0.35 a 1.05 kg·cm<sup>-2</sup>. Tan pronto como éste se libera dentro del sustrato, cae a la presión atmosférica cediendo su calor. Cuando una partícula alcanza 100 °C, entonces el vapor de agua se mueve a la siguiente partícula hasta difundirse en el área completa elevando la temperatura. La tasa de inyección debe ser tal que no exceda la tasa de condensación, la cual es aproximadamente 87.96 kg de vapor·h<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup> de superficie expuesta del medio;

cuando se tiene esta condición, el flujo de vapor de agua hacia el exterior del sustrato no ocurre (Bartok, 1994; Langhans, 1990).

**Cálculo de la cantidad de calor y de vapor de agua.** Bartok (1994) y Burés (1997) indican que la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de un volumen de sustrato dado depende de sus componentes, contenido de humedad y de la diferencia entre la temperatura más fría y la temperatura del tratamiento deseado. La tasa de flujo necesaria por minuto depende de qué tan rápido la mezcla sea llevada a la temperatura deseada, y comúnmente se dificulta medir la tasa de liberación, pues más bien se tiene por experiencia; sin embargo, el flujo debe ser lo suficientemente grande que no rompa y abra canales en el suelo o sustrato, es decir, la banda de condensación debe ser estrecha pero no rota (Bartok, 1994; Langhans, 1990). Para la mayoría de las aplicaciones son deseables 30 minutos de tiempo de calentamiento y 30 minutos de tiempo de contacto.

El calor específico por unidad de masa o de volumen de un suelo o de un sustrato resulta de sumar los calores específicos de los materiales constituyentes, y se puede calcular empleando las ecuaciones 1 y 2 (Burés, 1997; Langhans, 1990).

$$C_p = \sum_{i=1}^n (x_i)(C_{pi}) \quad (1)$$

Donde:  $C_p$  es el calor específico por unidad de masa del sustrato,  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;  $x_i$  es la cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional;  $C_{pi}$  - calor específico por unidad de masa de cada material constituyente  $\text{kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{°C}^{-1}$ .

$$C_v = \sum_{i=1}^n (x_i)(C_{vi}) \quad (2)$$

Donde:  $C_v$  es el calor específico por unidad de volumen del sustrato  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$ ;  $x_i$  es la cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional;  $C_{vi}$  es el calor específico por unidad de volumen de cada material constituyente  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$ .

La cantidad de calor requerido por unidad de volumen ( $Q_{RV}$ ) para llevar el suelo o sustrato a la temperatura deseada (temperatura de desinfección) se calcula con la ecuación 3.

$$Q_{RV} = (C_v)(\Delta T) \quad (3)$$

Donde:  $Q_{RV}$  es la cantidad de calor requerido por unidad de volumen,  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\Delta T$  es el incremento de temperatura,  $\text{°C}$ ;  $C_v$  es el calor específico por unidad de volumen del sustrato,  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$ .

La cantidad de vapor de agua requerida ( $Q_{VAR}$ ) para incrementar la temperatura inicial de  $1 \text{ m}^3$  de suelo o de sustrato a la temperatura deseada se calcula con la ecuación 4.

$$Q_{VAR} = \frac{(Q_{RV})}{Q_{LVA}} \quad (4)$$

Donde:  $Q_{VAR}$  es la cantidad de vapor requerido por unidad de volumen,  $\text{kg}$  de vapor· $\text{m}^{-3}$  de sustrato;  $Q_{RV}$  es la cantidad de calor requerido, por unidad de volumen,  $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $Q_{LVA}$  es el calor latente de vaporización del agua,  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  de vapor.

La cantidad de vapor requerido por cada desinfección se obtiene con la ecuación 5.

$$Q_{VRD} = (Q_{VR})(V) \quad (5)$$

Donde:  $Q_{VRD}$  es la cantidad de vapor requerido por cada desinfección,  $\text{kg}$  de vapor;  $Q_{VR}$  es la cantidad de vapor requerido,  $\text{kg}$  de vapor· $\text{m}^{-3}$  de sustrato;  $V$  es el volumen de sustrato a desinfectar,  $\text{m}^3$ .

El tiempo requerido para llevar el suelo o sustrato de la temperatura inicial a la temperatura deseada se obtiene con la ecuación 6.

$$t_r = \frac{(Q_{VRD})}{Q_{VC}} \quad (6)$$

Donde:  $t_r$  es el tiempo requerido para llevar el suelo o sustrato de la temperatura inicial a la deseada,  $\text{h}$ ;  $Q_{VRD}$  es la cantidad de vapor requerido por cada desinfección,  $\text{kg}$  de vapor;  $Q_{VC}$  es la cantidad de vapor generado por la caldera,  $\text{kg}$  de vapor· $\text{h}^{-1}$ .

### Aplicación de vapor de agua-aireado

El vapor de agua liberado de la caldera se aplica a una corriente de aire generada por un ventilador, formando una mezcla de vapor de agua y aire con una temperatura que puede variar de 60 a 82  $\text{°C}$ . El ventilador envía la mezcla de vapor de agua-aire a la parte inferior de un contenedor de doble fondo y la obliga a pasar a través del suelo o sustrato. Se usa una cobertura para retener el vapor de agua, pero se regula el escape de gases. Este equipo puede utilizarse con casi todos los equipos convencionales de aplicación de vapor de agua. En estos sistemas el suelo o sustrato se lleva a contenedores, se pasteuriza y se descarga a un medio de transporte para llevarlo a donde se requiera. La ventaja es que es un equipo sencillo y fácil de instalar (Langhans, 1990).

**Principio.** Cuando se mezcla el aire con el vapor de agua, la temperatura de éste se reduce de 100  $\text{°C}$  a temperaturas más bajas, pero sin condensación del vapor de agua. La temperatura exacta del vapor de agua-aireado depende de la temperatura del aire, de la humedad relativa y, de la temperatura del vapor de agua saturado (Bartok, 1994). La cantidad de aire que hay que

mezclar con el vapor de agua se fija en función de la temperatura deseada de tratamiento (Alpi y Tognoni, 1999). Así, para obtener una mezcla aire-vapor a 70 °C hay que mezclar 3.5 kg de aire por kilogramo de vapor a 100 °C. El tamaño de un ventilador se determina por la cantidad de aire que debe mover, y se da en metros cúbicos por minuto. Las unidades se dan para una presión estática de 49.85 a 62.31 mbars (Bartok, 1994).

**Cálculo del vapor de agua-aireado.** Interesa calcular los kilogramos de vapor de agua (el tamaño de la caldera), el volumen de aire (tamaño del ventilador) y el tiempo de duración para la aplicación de vapor de agua-aireado. Para calcular la cantidad de energía requerida y tiempo requerido para la desinfección se emplean las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6. El tiempo requerido para la desinfección se puede fijar. El flujo de calor aportado por el equipo se calcula mediante la ecuación 7 (Langhans, 1990).

$$q \frac{Q_T}{t_r} \quad (7)$$

Donde:  $q$  es el flujo de calor aportado por el equipo,  $W$ ;  $Q_T$  es la cantidad total de calor requerido para la desinfección,  $J$ ;  $t_r$  es el tiempo requerido para la desinfección,  $s$ .

El flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo se calcula con la ecuación 8.

$$q_{vaa} = \frac{q}{EE_{vaa}} \quad (8)$$

Donde:  $q_{vaa}$  es el flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo,  $m^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $q$  es el flujo de calor aportado por el equipo,  $\text{kJ} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $EE_{vaa}$  es el equivalente energético del vapor de agua-aireado  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$  (se obtiene de tablas [Langhans, 1990]).

La mayoría de los sistemas para aplicación de vapor de agua aireado asumen un 50 % de eficiencia, por lo cual el valor de  $q_{va}$  se multiplica por 2. El flujo de vapor de agua se calcula con la ecuación 9 (Langhans, 1994).

$$q_{va} = (q_{vaa}) (2) (RVAA) \quad (9)$$

Donde:  $q_{va}$  es el flujo de vapor de agua aportado por el equipo,  $\text{kg}_{va} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $q_{vaa}$  es el flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo,  $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ; RVAA es la relación de vapor de agua : aire para la temperatura fijada para la desinfección,  $\text{kg}$  de vapor de agua:  $\text{m}^3$  de aire.

La cantidad total de vapor de agua requerida para la desinfección se obtiene con la ecuación 10.

$$Q_{TVARD} = (q_{va}) (t_{fd}) \quad (10)$$

Donde:  $Q_{TVARD}$  es la cantidad total de vapor de agua aportado durante el tiempo fijado para la desinfección,  $\text{kg}$  de vapor de agua;  $t_{fd}$  es el tiempo fijado para la desinfección,  $\text{min}$ .

## Aplicación de aire caliente

Consiste en enviar una corriente de aire a la parte inferior de un contenedor de doble fondo, en el cual se ubica una resistencia eléctrica que cede calor a la corriente de aire; el aire calentado es forzado a pasar a través del sustrato cediendo su calor e incrementando la temperatura del sustrato.

**Principio.** Se basa en la disipación de potencia y energía en una resistencia eléctrica, ecuaciones (11) y (12) (Eaton, 1981), y en la transferencia de calor por convección y arrastre por una corriente de aire.

$$P = (R) (I^2) \quad (11)$$

$$E = (V) (I) (t) \quad (12)$$

Donde:  $P$  es la potencia eléctrica,  $W$ ;  $E$  - energía térmica disipada,  $J$ ;  $V$  es la diferencia de potencial,  $V$ ;  $I$  es la corriente eléctrica,  $A$ ;  $R$  es la resistencia eléctrica,  $W$ .

**Cálculo del tamaño de la resistencia eléctrica.** Se considera que el equipo para desinfección debe ser accesible para una corriente monofásica, con una diferencia de potencial de 127 voltios y una corriente eléctrica de 15 amperes. El tamaño de la resistencia eléctrica se calcula con las ecuaciones 11 y 13.

$$R = (\rho) \left( \frac{L}{A} \right) \quad (13)$$

Donde:  $\rho$  es la resistividad del material,  $\Omega \cdot m$ ;  $L$  es la longitud de la resistencia,  $m$ ;  $A$  es el área de la sección transversal del conductor,  $m^2$ .

**Cálculo de la cantidad de aire caliente.** El flujo volumétrico de aire caliente se calcula con las ecuaciones 14, 15 y 16 (UPONOR, 2006).

$$P_{er} = (V_c) (\rho_b) (C_{pa}) (\Delta T) (N) \quad (14)$$

$$N = \frac{P_{er}}{(V_c) (\rho_b) (C_{pa}) (\Delta T)} \quad (15)$$

$$q_{vac} = (N) (V_c) \quad (16)$$

Donde:  $q_{vac}$  es el flujo volumétrico de aire caliente,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $P_{er}$  es la potencia emitida por las resistencias,  $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $V_c$  es el volumen dado por la porosidad del suelo o sustrato,  $\text{m}^3$ ;  $\rho_b$  es la densidad del aire,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_{pa}$  es el calor específico del aire a presión constante,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $\Delta T$  es el salto térmico entre la temperatura inicial y deseada del suelo o sustrato,  $\text{°C}$ ;  $N$  es el número de renovaciones del volumen de aire dado por el espacio poroso del suelo o sustrato agrícola  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Cálculo del material aislante del contenedor

Para calcular el espesor del material aislante, se consideró que los mecanismos de transferencia de calor predominantes son conducción, ecuación de Fourier (17) y convección, ecuación de la ley de Newton de enfriamiento (18) (Kreith y Bohn, 2001).

$$q_k = -kA_s \frac{dT}{dx} \quad (17)$$

Donde:  $q_k$  es el flujo de calor por conducción, W;  $k$  es la conductividad térmica,  $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ;  $T$  es la temperatura,  $^\circ C$ ;  $x$  es el espesor del material a través del cual fluye el calor, m;  $A_s$  es el área de la superficie perpendicular al flujo de calor,  $m^2$ .

$$q_c = hA_s (\Delta T) \quad (18)$$

Donde:  $q_c$  es el flujo de calor por convección, W;  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ .

Con base en lo antes expuesto en este estudio, se planteó como objetivo diseñar y construir un equipo tipo remolque para desinfección en estático de suelos y sustratos agrícolas mediante aplicación de calor con vapor de agua-aireado y con aire caliente.

### MATERIALES Y MÉTODOS

**Chasis:** PTR 1/8" y 2". **Contenedor de doble fondo:** lámina de acero inoxidable calibre 18. **Malla para el doble fondo:** lámina de acero inoxidable calibre 18. **Tubería para la conducción de vapor de agua:** acero galvanizado cédula 40. **Tubería para la conducción de la mezcla vapor de agua y aire o aire solamente:** acero dulce. **Tubería para la conducción de aire solamente:** acero dulce.

**Cálculo de la capacidad del contenedor.** Aquí se consideró el proceso de desinfección con aire caliente solamente. Así, la capacidad del contenedor se calculó en función de la energía disponible en uno de los dos circuitos eléctricos de una casa habitación; es decir, una diferencia de potencial de 120 V y una corriente eléctrica de 15 A, y un tiempo de 3.5 horas para realizar el proceso de desinfección. Se calculó con las ecuaciones 1, 2, 3, 7, 11, 12, y 13.

**Cálculo de la cantidad de aire caliente.** Se calculó con las ecuaciones 14, 15 y 16.

**Cálculo del vapor de agua-aireado.** Se calculó con las ecuaciones 7, 8, 9 y 10.

**Cálculo del material aislante del contenedor.** Se calculó con las ecuaciones 17 y 18.

**Sistema de aplicación de calor con aire caliente.** Un ventilador produce una corriente de aire que pasa a través de dos resistencias eléctricas.

### Sistema de aplicación de calor con vapor de agua-aireado.

El vapor de agua se produce en una caldera y se mezcla con una corriente de aire producida por un ventilador.

**Sistema de control de temperatura.** El sistema de control de temperatura es automático.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Equipo para aplicar calor con vapor de agua-aireado

#### Componentes

Se observa en la Figura 1 que los componentes de este equipo son: 1) Contenedor de doble fondo. Aquí se ubica el sustrato que se quiere desinfectar, el vapor de agua-aireado entra por la parte inferior del contenedor; 2) Ventilador. Genera una corriente de aire; 3) Tubería de 101.6 mm. Conduce la mezcla de vapor de agua-aireado; 4) Tubería de 12.7 mm. Conduce el vapor de agua; 5) Caldera. Genera el vapor de agua; 6) Sistema de control de temperatura, sus componentes son: 6.1) Un termómetro bimetalico ubicado en la tubería para conducción de vapor de agua. Auxilia en el control de temperatura, 6.2) Un controlador de temperatura. Permite fijar la temperatura del proceso de desinfección, 6.3) Un indicador de temperatura. Muestra la temperatura de cada sensor, 6.4) Tres termopares. Sensan la temperatura del sustrato; 7) Válvulas tipo esfera. Permiten controlar el flujo de gases hacia el exterior del contenedor; 8)

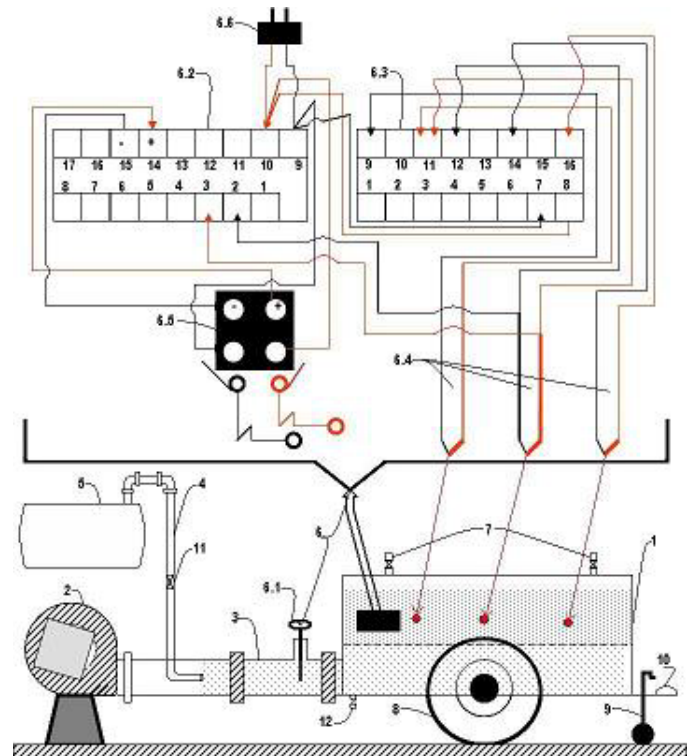


Figura 1. Equipo para aplicación de calor con vapor de agua-aireado.

Sistema de rodado. Neumáticos 155/85 R15; 9) Tornillo mecánico. Punto de apoyo que da estabilidad para cuando se maneja el material; 10) Jalón. Punto mediante el cual el equipo se acopla a un tractor o a una camioneta para su transporte; 11) Válvula esfera en la tubería para vapor de agua. Permite controlar el flujo de vapor de agua hacia el contenedor de doble fondo; 12) Válvula esfera en el contenedor. Permite controlar la salida de agua condensada del contenedor.

### Cálculo de la capacidad del contenedor

#### Cantidad de energía disponible en 3.5 horas:

$$P_{er} = (2) \left( 864 \frac{J}{s} \right) \left( 3600 \frac{s}{1h} \right) (3.5h) = 21772800J$$

$$= 21772.8kJ$$

#### Cantidad de calor requerido por el suelo:

$$Q_s = (m)(C_p)(\Delta T)$$

#### Capacidad másica del contenedor:

$$m = \frac{Q_s}{(C_p)(\Delta T)}; \text{ Haciendo } Q_s = P_{er} \text{ se tiene:}$$

$$m = \frac{21772.8kJ}{(0.2kcal / kg^{\circ}C)(4.1868kJ / kcal)(21^{\circ}C - 71^{\circ}C)}$$

$$= \frac{21772.8kJ}{41.868kJ / kg} = 520.034kg$$

#### Capacidad volumétrica del contenedor:

$$V = \frac{(m)}{\rho_b}; \text{ sustituyendo datos se tiene:}$$

$$V_c = \frac{520.034kg}{1067.393kg / m^3} = 0.4872001m^3 = 487.2litros$$

### Cálculo de la cantidad de vapor de agua aireado

#### El flujo de calor aportado por el equipo se calcula así:

$$q_{cva} = \frac{Q_T}{tr}; \text{ Sí } t_r = 5 \text{ min, sustituyendo datos se tiene:}$$

$$q_{cva} = \frac{21772.8kJ}{(5 \text{ min})(60s / \text{min})} = 72.576 \frac{kJ}{s}$$

#### El flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo se calcula así:

$$q_{vaa} = \frac{q_{cva}}{EE_{vaa}}, EE_{vaa} \text{ se obtuvo de tablas (Langhans, 1990)}$$

$$q_{vaa} = \frac{72.576kJ / s}{4142.90961kJ / m^3} = 0.017518 \frac{m^3}{s}$$

$$= 1.05108 \frac{m^3}{\text{min}} = 63 - 0648 \frac{m^3}{h}$$

#### La cantidad de vapor requerido se obtiene así:

$$Q_v = (q_{vaa})(RVAA)$$

$$Q_v = \left( 0.017518 \frac{m^3}{s} \right) \left( 0.39055 \frac{kg}{m^3} \right) = 0.0068416 \frac{kg_{vaa}}{s}$$

$$= 0.410496 \frac{kg}{\text{min}} = 24.62976 \frac{kg}{h}$$

#### Cantidad de vapor de agua para la desinfección:

$$Q_{vd} = \left( 0.410496 \frac{kg}{\text{min}} \right) (35 \text{ min}) = 1.36736$$

#### Tamaño de la caldera requerida, dado por la cantidad de caballos caldera (CC):

$$CC = \frac{14.36kg_{va} / h}{15.65kg / h} = 0.91CC$$

#### Enchaquetado del contenedor

El flujo de calor por conducción y por convección del interior hacia el exterior del contenedor se calcula así:

$$q_x = \frac{T_i - T_e}{\frac{L_{laii}}{k_{laii}A} + \frac{L_{fv}}{k_{fv}A} + \frac{1}{haA}}$$

Sustituyendo datos, se tiene:

$$q_x = \frac{71^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}}{\left(\frac{0.002\text{m}}{\left(15.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right)(2.4596\text{m}^2)}\right) + \left(\frac{L_{fv}}{\left(0.0389 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right)(2.4596\text{m}^2)}\right) + \frac{1}{\left(25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right)(2.4596\text{m}^2)}}$$

La temperatura hacia el exterior de la fibra de vidrio debe ser de  $23.5^\circ\text{C}$ ; por lo tanto, la ecuación de flujo de calor hacia el exterior también se puede plantear así:

$$q_x = \frac{T_{sfv} - T_e}{\frac{1}{(hae)(A_{fv})}}$$

Sustituyendo datos, se tiene:

$$q_x = \frac{23.5^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}}{\frac{1}{\left(25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right)(2.4596\text{m}^2)}} = \frac{2.5^\circ\text{C}}{0.0162628069 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}}$$

$$= 153.725\text{W}$$

Igualando las dos ecuaciones, se tiene:

$$L_{fv} = \left(\frac{50^\circ\text{C} - 2.5^\circ\text{C}}{153.725\text{W}}\right) \left(0.09567844 \frac{\text{Wm}}{^\circ\text{C}}\right) = 0.0295;$$

$$L_{fv} = 2.95\text{cm} \approx 3\text{cm}$$

### Características técnicas

**Contenedor.** Se compone de una cavidad superior con dimensiones de  $1,740 \times 1,120 \times 250$  mm de largo, ancho y alto, respectivamente, y una cavidad inferior con dimensiones de  $1,740 \times 1,120 \times 180$  mm de largo, ancho y alto, respectivamente. El material de ambas cavidades es de lámina de acero inoxidable calibre 18. **Camisa o chaqueta.** Se compone de dos tapas laterales con dimensiones de  $1,800 \times 453$  mm de largo y ancho, respectivamente, y una tapa frontal y posterior, ambas con dimensiones de  $1,170 \times 453$  mm de largo y ancho, respectivamente. El material de aislamiento es fibra de vidrio con un espesor de 30 mm. **Tubería para la conducción de vapor de agua-airado.** Compuesta por dos tramos de tubo de acero dulce, cada uno con 101.6 mm de diámetro y 500 mm de longitud; dos niples de acero galvanizado con 101.6 mm de diámetro y 95.25 mm de longitud. La longitud total de la tubería empotrada es de 1,190.5 mm. **Tubería para la conducción de vapor de agua.** Consta de un tubo en L, galvanizado, cédula 40, con 25.4 mm de diámetro, 50 mm de longitud de la base y 100 mm de altura; una válvula bola con 25 mm de diámetro. **Ventilador.** De 3,500 rpm, 186.42 W y un

gasto de  $6.66 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . **Capacidad.** 487.2 litros. **Productividad.** 487.2 litros de sustrato agrícola por hora.

### Sistema de aplicación de calor



Figura 2. Sistema de aplicación de calor: a) caldera, b) ventilador, c) válvula esfera.

La Figura 2 muestra los componentes de este sistema. El calor se aplica mediante un flujo compuesto por una mezcla 3:1 de aire y vapor de agua, respectivamente. La corriente de aire se aplica con un ventilador, y el vapor de agua con una caldera. El tamaño de la caldera requerida debe estar por arriba de  $\frac{1}{2}$  caballo caldera.

### Sistema de control de temperatura



Figura 3. Sistema de control de temperatura: a) Termómetro bimetalico, b) Termopares, c) Indicador de temperatura.

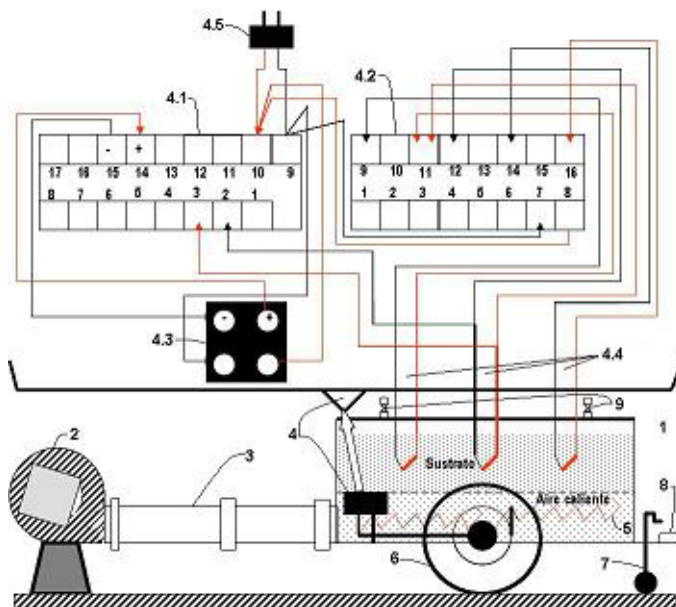
Se puede observar en la Figura 3 que este sistema se compone de un termómetro bimetalico, tres termopares y un indicador de temperatura. El termómetro bimetalico indica la temperatura de la mezcla de aire-vapor de agua. Los termopares son tipo J, sensan la temperatura en la parte media del suelo o



**Figura 4. Equipo tipo remolque para desinfección en estático con vapor de agua-aireado.**

sustrato, y están posicionados en la parte media del contenedor. El indicador de temperatura indica la temperatura sensada por cada termopar. En la Figura 4 se muestra el equipo.

#### Equipo para aplicar calor con aire caliente



**Figura 5. Equipo para aplicación de calor con aire caliente.**

#### Componentes del equipo para aplicar calor con aire caliente

Se observa en la Figura 5 que los componentes de este equipo son: 1) Contenedor de doble fondo. Aquí se ubica el sustrato que se quiere desinfectar; el aire caliente entra por la parte inferior del contenedor; 2) Ventilador. Genera una corriente de aire; 3) Tubería de 101.6 mm de diámetro. Conduce la corriente de aire; 4) Sistema de control de temperatura; sus componentes

son: 4.1) Un controlador de temperatura. Permite fijar la temperatura del proceso de desinfección, 4.2) Un indicador de temperatura. Muestra la temperatura sensada por cada termopar, 4.3) Un relevador. Abre y cierra el circuito eléctrico hacia las resistencias eléctricas; 4.4) Tres termopares. Sensan la temperatura del sustrato, 4.5) Alimentación de la corriente eléctrica. La toma de corriente es en un circuito eléctrico monofásico; 5) Resistencias eléctricas. Dos resistencias en forma de M. Producen calor debido al efecto Joule; 6) Sistema de rodado. Neumáticos 155/85 R15; 7) Tornillo mecánico. Punto de apoyo que da estabilidad para cuando se maneja el material; 8) Jalón. Punto mediante el cual el equipo se acopla a un tractor o a una camioneta para su transporte.

#### Cálculo de la cantidad de aire caliente

El flujo volumétrico de aire caliente se calcula con las ecuaciones 14, 15 y 16 (UPONOR, 2006).

$$N = \frac{(2)(0.864 \text{ kJ} / \text{s})}{(0.487 \text{ m}^3)(0.5849)(1.1996 \text{ kg} / \text{m}^3)(1.007 \text{ kJ} / \text{kg}^\circ\text{C})(50^\circ\text{C})}$$

$$= 0.100437 \left( \frac{1}{\text{s}} \right)$$

$$q_{ac} = \left( 0.100437 \frac{1}{\text{s}} \right) (0.487 \text{ m}^3) (0.5849) = 0.028609 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 1.71654 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 102.9924 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

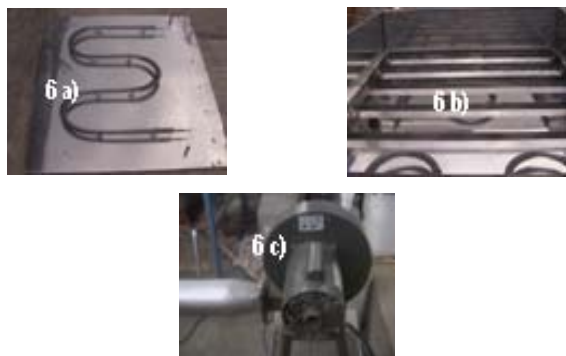
$$q_{ac} = 102.9924 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

#### Características técnicas

**Contenedor.** El dimensionado y camisa o chaqueta del contenedor es el mismo que se describió en el apartado para cuando el calor se aplicó con vapor de agua-aireado. **Tubería para la conducción de aire caliente.** Compuesta por dos tramos de tubo de acero dulce, cada uno con 101.6 mm de diámetro y 500 mm de longitud; dos niples de acero galvanizado con 101.6 mm de diámetro y 95.25 mm de longitud. La longitud total de la tubería empotrada es de 1,190.5 mm. **Ventilador.** De 3,500 rpm, 186.42 W y un gasto de  $6.66 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . **Resistencias eléctricas.** Son dos resistencias eléctricas conectadas en paralelo; cada resistencia eléctrica es de 864 watts. El material que compone cada resistencia es de nicromel, con 2 mm de diámetro y 900 mm de longitud en forma de M. **Capacidad.** 487.2 litros. **Productividad.** 121.8 litros hora.



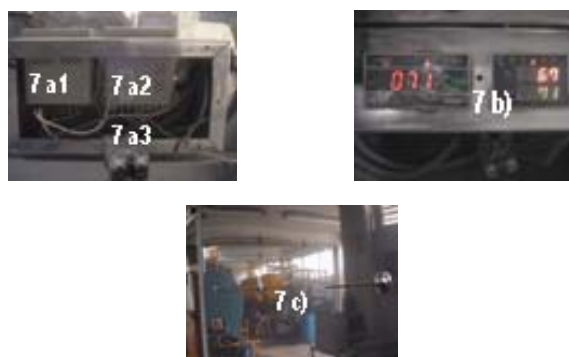
### Sistema de aplicación de calor



**Figura 6. Sistema de aplicación de calor: a) resistencia eléctrica en W, b) persianas, c) ventilador.**

La Figura 6 muestra los componentes de este sistema. El calor se aplica mediante una corriente de aire caliente. El flujo de aire se aplica con un ventilador a la cavidad inferior del contenedor en la cual se encuentran dos resistencias eléctricas.

### Sistema de control de temperatura



**Figura 7. Sistema de control de temperatura: 7a1) controlador, 7a2) indicador, 7a3) relevador, 7b) controlador e indicador de temperatura funcionando, y 7c) termopares.**

La Figura 7 muestra los componentes de este sistema. Se compone de un controlador de temperatura (pirómetro), un indicador de temperatura y tres termopares. En la Figura 8 se muestra el equipo tipo remolque para desinfección en estático con aire caliente.



**Figura 8. Equipo tipo remolque para desinfección en estático con aire caliente.**

### Propósito del equipo con ambas modalidades de aplicación de calor

Erradicar patógenos de las plantas, hospedados en suelos y sustratos agrícolas, por muerte térmica aplicando calor con vapor de agua-aireado y con aire caliente.

### Aplicación con ambas modalidades de aplicación de calor

Desinfección de suelos y sustratos agrícolas utilizados en la producción de plántulas y cultivos en viveros y agricultura protegida.

### CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un equipo tipo remolque para desinfección en estático de suelos y sustratos agrícolas con vapor de agua-aireado y con aire caliente.

Para aplicar calor con aire caliente se puede conectar a un circuito eléctrico de 120 V y 15 A.

Para aplicar calor con vapor de agua-aireado se requiere de una caldera con capacidad igual o mayor a 0.5 caballos caldera.

Con ambos procedimientos se controla la temperatura entre 71 y 72 °C por tiempo indefinido.

Con vapor de agua-aireado su productividad es de 487 L·h<sup>-1</sup>, y con aire caliente de 121 L·h<sup>-1</sup>.

Accesible para los pequeños productores de plántulas de ornamentales, hortalizas y cultivos bajo invernadero.

Es un equipo que no contamina el medio ambiente con ninguno de ambos métodos de aplicación de calor.

### LITERATURA CITADA

- Alpi A.; Tognoni F. 1999. Cultivo en invernadero. Segunda edición. Mundi-Prensa. España. Versión española por Cerisola C. I. y Domínguez Castillo E. Traducción del italiano. 347 p.
- Baker K. F. 1962. Principles of heat treatment of soil and planting material. The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science. 118-126.
- Bartok J. W. Jr. 1994. Steam sterilization of growing media. Proceedings, Forest and Conservation Nursey Associations. Williamsburg, Va. Gen. Tech. Rep. RM-GTR-257. For Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 163-165. Available at: <http://www.fcnet.org/proceedings/1994/bartok1.pdf>. Consultado en 2006.
- Brady N. C.; Weil R. R. 1999. Elements of the nature and properties of soils. 12ª Edition. Prentice Hall, Inc. USA. 259 p.
- Burés S. 1997. Sustratos. Primera Edición. Agrotécnicas F.L. España. 342 p.
- Castro C. E. 1964. Analytical methods for pesticides, plant growth regulators and food additions. Gunther Zweig, 159-64 p.

- Eaton J. R. 1981. Principios de electricidad. 14ª Impresión. Constancia S.A. México. Traducción del Inglés. 404 p.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2002. Steam as an Alternative to Methyl Bromide in Nursery Crops. URL: <http://www.epa.gov/>. Consultada en 2006.
- French E.R.; Hebert T.I. 1997. Soil preparation and disinfesting: Extracted from methods of phytopathology. IICA. San José, Costa Rica. Centro Internacional de la papa (CIP). 12 p.
- Gehring. 1991. Solvents, fumigants and related compounds. *Handbook of pesticide toxicology*. Academic Press. San Diego CA. (2) 637-730 p.
- Gracia L. C.; Martín-Portugués E. P. 1983. Mecanización de los cultivos hortícolas. Primera Edición. Mundi-Prensa. España. 243 p.
- Kreith F.; Bohn M. S. 2001. Principios de transferencia de calor. Sexta Edición. Thomson Learning. Impreso en México. 700 p.
- Langhans R. W. 1990. Greenhouse Management: A guide to structures, environmental control, materials handling, crop programming and business analysis. Third Edición. Halcyon Press of Ithaca. USA. 274 p.
- Nelson P. V. 1998. Greenhouse operation and management. Fifth edición. Prentice Hall. USA. 637 p.
- Runia W. T. 2000. Steaming methods for soils and substrates. *Acta Horticulturae* 532, 115-123.
- UPONOR. 2006. Manual técnico de aplicaciones de calefacción y climatización UPONOR. <http://www.uponoriberia.com>. Consultada en 2006.
- Velázquez B. M.; Osca J. M.; Jordá C.; Marzal A. 2003. Estudio de la viabilidad de la eliminación de semillas de malas hierbas en el suelo por radiación de microondas. *Boletín de Sanidad Vegetal* 129. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 49-55.