



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA ESPAÑA
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO MÉXICO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO MÉXICO**

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONVECCIÓN EN EL
TRATAMIENTO TÉRMICO DE SUELOS O SUSTRATOS
AGRÍCOLAS PARA SU DESINFECCIÓN EN CONTINUO**

DOCTORANDO: Noel Chávez Aguilera

DIRECTOR: Dr Borja Velázquez Martí

Julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido el esfuerzo de varias personas y universidades, lo cual demuestra lo afortunado que he sido en el proceso de formación académica y profesional para hacerme una persona de bien y útil a la sociedad.

En primer lugar quiero manifestar mi más sincero agradecimiento al Dr. Borja Velázquez Martí y al Dr. Carlos Gracia López quienes me han abierto la puerta al mundo de la investigación con su esfuerzo, dedicación, motivación, conocimientos, sabiduría, guía, apoyo, dirección y paciencia durante la ejecución, desarrollo y terminación de este trabajo de investigación, lo cual sin lugar a duda me ha enriquecido profesionalmente y sobre todo ayudado a crecer como persona.

Quiero agradecer a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, ESPAÑA; A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, MÉXICO (UACH) Y A LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO, MÉXICO** por ser instituciones de educación pública superior que me han brindado apoyo y la oportunidad para realizar mis estudios de doctorado.

Agradezco a los profesores del programa de Doctorado en Mecanización y Tecnología de Invernaderos del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Valencia, España, en el marco del cual he realizado mis estudios de doctorado y la presente tesis doctoral.

Quiero agradecer también al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la UACH, México, por apoyarme con sus laboratorios y talleres y, brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado. Al Departamento de Parasitología Agrícola de la UACH, México, por apoyarme con su laboratorio de Micología durante la verificación de la efectividad de los equipos para desinfección de suelos y equipos agrícolas.

Agradezco a los estudiantes del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la UACH, quienes realizaron su trabajo de investigación (Tesis) en la verificación técnica de los equipos diseñados y construidos para desinfección de suelos y sustratos agrícolas, actualmente Ingenieros Mecánicos Agrícolas, por su dedicación y aporte a presente tesis.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a **mis padres:** Ernesto Chávez Aburto y Juana Aguilera Hurtado (finada), quienes han sido pilares

en mi vida y, a **mi familia:** Josefina López Zavala (Esposa) quien con su preparación académica, no sólo, me ha apoyado en lo moral, sino que, también en una orientación técnica durante el desarrollo de mi tesis; a Noel Chávez López (hijo) y a Josefina Chávez López (hija) quienes junto con mi esposa me han impulsado a conseguir sueños, a pesar de que ello signifique soportar mi ausencia.

RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de cilindros concéntricos para desinfección de suelos y sustratos agrícolas en continuo. Para ello se considera el sustrato agrícola como un fluido que circula por el cilindro central accionado por un tornillo sinfín; por la corona exterior circula un caloportador que cede el calor al sustrato a desinfectar, por lo que el sistema de transmisión es convectivo. Para el dimensionado del dispositivo se han analizado las propiedades termodinámicas de dos tipos de sustratos agrícolas: un sustrato telzone rojo y un sustrato peat moss. De cada uno de ellos se calculó la densidad (con medias $1169,603 \text{ kg m}^{-3}$ y $300,23 \text{ kg m}^{-3}$), calor específico ($3,4$ y $4,1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), conductividad térmica ($9,97 \text{ J m}^{-1}\text{s}^{-1}$ y $8,6 \text{ J m}^{-1}\text{s}^{-1}$) y difusividad térmica ($2,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $2,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) respectivamente. Se analizó la influencia de la humedad y la compactación en estos parámetros. Por otra parte se ha analizado el sistema de convección de tres caloportadores: agua caliente, vapor de agua y aire caliente. De cada uno de ellos se determinó el coeficiente de transmisión de calor del sistema en función de la humedad y velocidad de circulación del sustrato. Se ha construido un dispositivo para la validación de los cálculos. Los coeficientes de película de los sustratos probados, con aplicación de aire caliente, son: $0,73 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $0,65 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para telzone rojo y peat moss respectivamente. Los ensayos de desinfección sobre ambos sustratos infectados con hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*, eliminaron prácticamente el 100% de las colonias. Tras la desinfección, plantas de jimote rojo (*Solanum lycopersicon*, L.) fueron cultivadas sobre los sustratos tratados y no desarrollaron afecciones.

Palabras clave: Desinfección de sustratos agrícolas, método físico, intercambiador de calor, tecnología de invernaderos

Este trabajo de investigación fue realizado entre la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. Fue desarrollado en los talleres y laboratorios del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola y el Departamento de Parasitología Agrícola, ambos departamentos, de la UACH.

ABSTRACT

In this work, a model of calculation for the design of cylindrical heat exchangers was developed for disinfection of soils and agricultural substrates in continuous. For this purpose, the ground is considered as a fluid, flowing through the central cylinder driven by a screw; though outer ring circulates a heat carrier which transfers heat to the agricultural substrate for its disinfection, so that the transmission system is convective. For the dimensioning of the device thermodynamic properties of two types of agricultural substrates have been analyzed: a substrate red telzone and a substrate peat moss. Of each, density was calculated with averages 1169.6 kgm^{-3} and 300.23 kgm^{-3} respectively, specific heat ($3.4 - 4.2 \text{ MJm}^{-3}\text{°C}^{-1}$), thermal conductivity ($9.97 \text{ J m}^{-1}\text{s}^{-1}$ and $8.6 \text{ J m}^{-1}\text{s}^{-1}$ and thermal diffusivity ($2.73 \cdot 10^{-6}$ and $2.45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) respectively. The influence of moisture and compaction in these parameters are analyzed. Furthermore we analyzed the convection system by three heat transfer: hot water, steam and hot air. Global transmission coefficient of the system was determined for each heat transfer, depending on the soil moisture content and velocity. A device has been built for the validation of the calculations. The heat transfer coefficient or film coefficient of the tested substrates, with the application of hot air, are: $0.73 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ and $0.65 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for red telzone and peat moss respectively. The testing of disinfection on a substrate red tezontle and substrate peat moss infected with fungus *Fusarium oxysporum lycopersici*, eliminated almost 100% of the colonies. After the disinfection jimson weed plants (*Solanum Lycopersicon*, L.) were grown on the substrates treated and not developed affections.

Key words: Disinfection of agricultural substrates, physics method, greenhouse technology, heat exchanger.

This research work was carried out between the two institutions Polytechnic University of Valencia (UPV), Spain and the Autonomous University Chapingo (UACH), Chapingo, Mexico. It was developed in the workshops and laboratories of the Department of Agricultural Mechanical Engineering and Agricultural and, the Department of Agricultural Parasitology, both departments of the UACH.

RESUM

En aquest treball s'ha desenvolupat un model de càlcul per al disseny d'intercanviadors de calor de cilindres concèntrics per a desinfecció de sòls i substrats agrícoles en continu. Per fer això, es considera el sòl com un fluid que circula per un cilindre central accionat per un cargol sense fi; per la corona exterior circula un caloportador que cedeix la calor al sòl a desinfectar, per la qual cosa el sistema de transmissió és convectiu. Per al dimensionament del dispositiu s'han analitzat les propietats termodinàmiques de dos tipus de substrats: telzone roig i substrat peat moss. De cada un d'ells es va calcular la densitat amb mitjanes de $1169,60 \text{ kgm}^{-3}$ y $300,23 \text{ kgm}^{-3}$; calor específic ($3,4\text{-}4,2 \text{ MJm}^{-3}\text{°C}^{-1}$); conductivitat tèrmica ($9,97 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ i $8,6 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$) i difusivitat tèrmica ($2,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ i $2,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) respectivament. Es va analitzar la influència de la humitat i la compactació en aquests paràmetres. D'altra banda s'ha analitzat el sistema de convecció de tres termòfors: aigua calenta, vapor d'aigua i aire calent. De cada un d'ells es va determinar el coeficient de transmissió de calor del sistema en funció de la humitat i velocitat de circulació del substrat. S'ha construït un dispositiu per a la validació dels càlculs. Els coeficients de pel·lícula en els substrats probats amb aire calent són: $0,73 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ i $0,65 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ per a telzone roig i substrat peat moss respectivament. Els assajos de desinfecció sobre un substrat telzone roig i substrat peat moss infectats amb fong *Fusarium oxysporum lycopersici* L. van eliminar pràcticament el 100% de les colònies. Després de la desinfecció plantes de jimote vermell (*Solanum lycopersicon*, L.) van ser cultivades sobre els substrats tractats i no van desenvolupar afeccions.

Paraules clau: Desinfecció de substrats agrícoles, mètode físic, Intercanviador de calor, tecnologia d'hivernacles.

Aquest treball de recerca va ser realitzat entre la Universitat Politècnica de València (UPV), Espanya, i la Universitat Autònoma Chapingo (UACH), Mèxic. Va ser desenvolupat en els tallers i laboratoris del Departament d'Enginyeria Mecànica Agrícola i el Departament de Parasitologia Agrícola, els dos departaments, de la UACH.

CONTENIDO

	Pag
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE ANTECEDENTES	5
II.1 Los sustratos y su desinfección	5
II.2 Aplicación de calor seco con flama	10
II.3 Aplicación de calor seco con resistencia eléctrica	14
II.4 Pasteurización con vapor	15
II.4.1. Cálculo de la cantidad de calor y de vapor de agua	20
II.4.2 Métodos y equipos para aplicar calor húmedo	23
II.5 Control por Solarización	49
II.6 Control por Aplicación de Llama	51
II.7 Control mediante radiación electromagnética infrarrojos	54
II.8 Tratamiento térmico del suelo irradiado por microondas	56
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	57
III.1 Objetivo general	57
III.2 Objetivos particulares	57
III.3 Hipótesis	57
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	59
IV.1 Propiedades térmicas de los suelos y sustratos agrícolas	59
IV.1.1 Dispositivo experimental	59
IV.1.2 Determinación del calor específico (C_v), la conductividad térmica (k) y difusividad térmica (D_t)	62
IV.1.3 Relación de k y C_p con el diámetro y longitud	66
IV.2 Determinación de coeficientes de película	68
IV.3 Verificación de la desinfección de patógenos mediante el sistema diseñado	76
IV.3.1 Preparación de las muestras	76
IV.3.2 Tratamientos con aplicación de calor mediante fluidos	
IV.3.3 Metodología empleada para obtener el índice de incidencia del hongo	
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
V.1 Propiedades térmicas de los suelos y sustratos agrícolas	93
V.2 Diseño del intercambiador por convección	106
V.3 Sistemas de aplicación de calor	122
V.4 Cálculo del coeficiente de película para distintas	124

propiedades térmicas	
V.5 Evaluación del equipo de desinfección diseñado	126
V.6 Desinfección del hongo <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> (UFC/g _{Sustrato})	132
V.6.1 Presencia de Unidades Formadoras de colonias de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> en tezontle rojo tras cada tratamiento	132
V.6.2 Presencia de Unidades Formadoras de colonias de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> en peat moss tras cada tratamiento	135
V.6.3 Incidencia de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) del hongo	139
V.6.4 Incidencia de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) del hongo (<i>Fusarium oxysporum lycopersici</i>) en las plantas cultivadas en peat moss	141
V.7 Resumen de resultados	144
VI. CONCLUSIONES	149
VII. PUBLICACIONES DE LA TESIS	151
VIII. BIBLIOGRAFÍA	153

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Inactivación térmica de las enfermedades y plagas más importantes.	12
Tabla 2. Temperaturas necesarias para erradicar plagas del suelo.	13
Tabla 3. Cantidad de vapor de agua necesario para tratar el sustrato.	20
Tabla 4. Características de las máquinas ensayadas por Peruzzi con el sistema Alce Garden	37
Tabla 5. Características técnicas de calderas destinadas a la desinfección de suelo	39
Tabla 6. Relaciones vapor de agua:aire y aire:vapor de agua, y kJ m^{-3} de la mezcla vapor de agua-aireado para varias temperaturas, con aire a 21 °C a 50 % de humedad relativa y vapor de agua saturado a 110 °C	41
Tabla 7. Características técnicas de algunos aplicadores de infrarrojos comerciales	56
Tabla 8. Niveles estudiados en los factores para el suelo franco-arenoso	65
Tabla 9. Niveles estudiados en los factores para el sustrato Peat moss	65
Tabla 10. Experimentos realizados para el análisis de las propiedades térmicas	66
Tabla 11. Número de conidios o propágulos resultados del conteo de la cámara Neubauer	86
Tabla 12. Nomenclatura y características de los tratamientos	87
Tabla 13. Propiedades físicas de los sustratos estudiados en el dispositivo Experimental	93
Tabla 14. Descripción estadística de las variables térmicas	93
Tabla 15. Ecuaciones lineales de la temperatura en función del tiempo	103
Tabla 16. Ecuación lineal para estimar $T = f(r)$	105
Tabla 17. Conductividad térmica	105
Tabla 18. Radio y longitud del intercambiador de calor para la interacción $GC*W$	106
Tabla 19. Valores medios del radio y longitud	107
Tabla 20. Capacidad del transportador de tornillo sin fin	117
Tabla 21. Potencia requerida por el transportador de tornillo sin fin	118
Tabla 22. Pruebas de Tukey para la fuente de variación W sobre las variables termodinámicas $h_i T_{es}$, h_{im} y Q_m	125
Tabla 23. Propiedades de dos materiales a desinfectar bajo estudio	126
Tabla 24. Capacidad volumétrica del intercambiador	126
Tabla 25. Medidas de coeficiente de transmisión global de calor para	131

tezontle rojo

Tabla 26. Unidades formadoras de colonias presentes después de la aplicación de tratamientos en Telzone rojo	132
Tabla 27. Unidades formadoras de colonias (UFC/g_{Tez}) presentes en el testigo	133
Tabla 28. Análisis de varianza para fuentes de variación sobre las UFC/g_{Tez} en tezontle rojo	133
Tabla 29. Pruebas de Tukey para fuentes de variación sobre la variable (UFC/g_{Tez}) en tezontle rojo	134
Tabla 30. Análisis de varianza para fuentes de variación sobre la variable UFC/g_{Tez} en tezontle rojo	134
Tabla 31. Pruebas de Tukey para fuentes de variación sobre la variable (UFC/g_{Tez}) en el testigo de tezontle rojo	135
Tabla 32. Unidades Formadoras de Colonias presentes después de la aplicación de tratamientos sobre peat moss	136
Tabla 33. Unidades de Formadoras de Colonias (UFC/g_{pm}) presentes en el testigo en peat moss	136
Tabla 34. Análisis de varianza para fuentes de variación sobre las Unidades de Formadoras de Colonias <i>Fusarium oxysporum licoperisci</i> en peat moss	137
Tabla 35. Pruebas de Tukey de los tratamientos (T) sobre la variable (UFC/g_{pm}) en peat moss	137
Tabla 36. Análisis de varianza para los tratamientos (T) sobre las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{pm}) en peat moss	138
Tabla 37. Pruebas de Tukey en las repeticiones sobre la variable (UFC/g_{pm})	138
Tabla 38. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de Tratamientos en tezontle	139
Tabla 39. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) presentes en el testigo para Tezontle rojo	139
Tabla 40. Análisis de varianza de los tratamientos y repeticiones sobre la variable IUFC en tezontle rojo	140
Tabla 41. Pruebas de Tukey para los tratamientos (T) y repeticiones (R) sobre la variable (IUFC) en tezontle rojo	141
Tabla 42. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de tratamientos en peat moss	142
Tabla 43. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) presentes en el testigo	142
Tabla 44. Análisis de varianza de los tratamientos sobre la variable IUFC en peat moss	143
Tabla 45. Pruebas de Tukey de los tratamientos sobre la variable (IUFC) en peat moss	144

Tabla 46. Propiedades de los sustratos bajo estudio	144
Tabla 47. Rangos de diseño para intercambiadores de calor destinados a desinfección de suelos y sustratos agrícola	146

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Esterilización del suelo mediante leña o carbón	11
Figura 2. Equipo para esterilización del suelo con leña o carbón.	13
Figura 3. Tanque rotativo esterilizador de suelo o sustrato	14
Figura 4. Esterilizadores eléctricos	14
Figura 5. Mezcla manual de fertilizante con suelo antes de pasteurizar	17
Figura 6. Empotrar los bordes de la cobertura con peso	18
Figura 7. Proceso de aplicación de vapor de agua al suelo o sustrato mostrando un rompimiento	19
Figura 8. Bancal sin salida para el aire del suelo o sustrato	19
Figura 9. Bancal con salidas para el aire del suelo o sustrato	20
Figura 10. Parrilla Hoddesdon para desinfectar el sustrato	24
Figura 11. Parrilla Hoddesdon y equipo auxiliar	24
Figura 12. Sistema politubos perforados enterrados bajo la superficie de una cama	24
Figura 13. Sistema politubos perforados enterrados bajo la superficie de un bancal	25
Figura 14. Sistema de un solo tubo enterrado bajo la superficie de un bancal	25
Figura 15. Sistema de tubos de drenaje	26
Figura 16. Parrilla con brazos tubulares	26
Figura 17. Equipo “a lona” para esterilización parcial del suelo o del sustrato	27
Figura 18. Equipo para la desinfección del suelo con vapor de agua presurizado	28
Figura 19. Equipo a lámina” de vaporización	28
Figura 20. Lámina de plástico para vaporización	29
Figura 21. Rastrillo para aplicación de vapor de agua	30
Figura 22. Rastrillo jalado por una maquinilla	30
Figura 23. Rastrillo jalado por una máquina autopropulsada	31
Figura 24. Reja en forma de cuña para aplicar vapor de agua	31
Figura 25. Inyector de vapor de agua	33
Figura 26. Túnel para la aplicación de vapor de agua	33
Figura 27. Equipo “a campana”	34
Figura 28. Equipo para liberación de vapor sobrecalentado	36
Figura 29. Esquema del primer prototipo remolcado de la máquina para la desinfección del terreno de la empresa Celli, utilizado en las pruebas durante el año 1999: (a) generador del vapor; (b) panel de	37

control; (c) generador de electricidad; (d) barra distribuidora del vapor de agua; (e) arado-extendedora del film	
Figura 30. Vista lateral de la máquina para la desinfección del terreno versión Remolcada	38
Figura 31. Esquema de la versión suspendida para la desinfección del terreno adaptada para efectuar el tratamiento en pleno campo: (1) depósito de agua; (2) generador de vapor; (3) depósito que contiene la sustancia a reacción exotérmica; (4) rotor de hojas; (5) barra de distribución del vapor; (6) bobina de film plástico; (7) barra compactadora; (8) arado-extensión del film	38
Figura 32. Esquema de la máquina autopropulsada para la desinfección del terreno adaptada para efectuar el tratamiento en invernadero: (1) cuerpo de la máquina que contiene el generador de vapor, el panel de control y el generador de electricidad; (2) depósito que contiene la sustancia; (3) rotor de hojas; (4) sistema para la regulación de la profundidad de trabajo del rotor; (5) barra de distribución del vapor; (6) bobina de film plástico; (7) barra compactadora; (8) arado-extensión del film	39
Figura 33. Sistema para la aplicación de vapor de agua por presión negativa	40
Figura 34. Cubo cubierto.	41
Figura 35. Banco para aplicar vapor de agua-aireado de arriba hacia abajo al suelo o sustrato	42
Figura 36. Sistema estático para la aplicación de vapor de agua-aireado de abajo hacia arriba	43
Figura 37. Sistema móvil tipo carretilla.	44
Figura 38. Sistema móvil tipo remolque.	44
Figura 39. Equipo utilizado para aplicar vapor de agua-aireado dentro de un remolque	45
Figura 40. Esquema de los componentes de un quemador de malas hierbas en sistema de post-emergencia	52
Figura 41. Esquema sobre la forma de acción de la llama en un sistema de control de malas hierbas en preemergencia	53
Figura 42. Esquema de la acción del quemador, en un sistema pos-emergente, Selectivo	53
Figura 43. Fotografía de las boquillas aplicadoras de llama en el banco del laboratorio de la universidad de Pisa	54
Figura 44. Equipo para determinar el calor específico, conductividad térmica y la difusividad térmica	56
Figura 45. Localización de los termopares	60
Figura 46. Calentador de agua.	60
Figura 47. Dimensionamiento del intercambiador de calor	70

Figura 48. Esquema del modulo de desinfección por agua caliente y sistema de control de temperatura	71
Figura 49. Sistema de aplicación vapor de agua	71
Figura 50. Sistema de aplicación aire caliente	72
Figura 51. a) Cilindros concéntricos, b) Bastidor del aparato, c) Tornillo sin fin	74
Figura 52. Fabricación de uno de los anillos de unión	74
Figura 53. Separación entre termopares	75
Figura 54. Conidios vistos desde un microscopio a 40x	77
Figura 55. Aislamientos monoconidiales de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i>	77
Figura 56. Tezontle rojo en la mina	78
Figura 57. Peat moss	78
Figura 58. Esterilización del sustrato con la olla de Presión	78
Figura 59. Remolque para la desinfección de sustratos en estático	79
Figura 60. Medio PDA preparado en polvo	79
Figura 61. Medio en la olla de presión	79
Figura 62. Medio en la cámara estéril	80
Figura 63. Medio Agar en su presentación del mercado	80
Figura 64. Medio Agar-Agua preparado	80
Figura 65. Agar en polvo (124)	80
Figura 66. Caja Petri con medio Agar-Agua	80
Figura 67. Vaciado de la suspensión en la caja Petri	81
Figura 68. Cajas petri con hongo <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i>	81
Figura 69. Raspado del micelio	82
Figura 70. Eliminación del micelio mediante la manta de cielo	82
Figura 71. Solución madre	85
Figura 72. Cámara de Neubauer	85
Figura 73. Microscopio estereoscópico electrónico	85
Figura 74. Cámara Neubauer	85
Figura 75. Tween 20	85
Figura 76. Rayado de “Neubauer” hematocímetro Spencer; cuadrados principales (C.P) de 1 mm por lado y cuadrados secundarios (C.S) de 0.2 mm por lado	86
Figuras 77. Plantas contenidas en las charolas de poliestireno y el Fertilizante Aplicado	88
Figura 78. Trasplante en tezontle y en peat moss	89
Figura 79. Testigo en tezontle y peat moss	89
Figuras 80. Fertilizantes utilizados y depósito para la solución	90

nutritiva con capacidad de 200 l	
Figura 81. Acomodo y Tutoreo de las plantas	90
Figura 82. Balanza Granataria	91
Figura 83. Balanza Digital	91
Figura 84. Recipientes de 20 litros	91
Figura 85. Charolas utilizadas para la germinación de Semillas	91
Figura 86. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Telzone Rojo	96
Figura 87. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Peat moss	97
Figura 88. Análisis de la interacción grado de compactación y humedad en el Telzone rojo (a) y el peat moss (b) a través de los intervalos LSD a un nivel de confianza del 95%	98
Figura 89. Variación de la temperatura en función del tiempo en distintos puntos del suelo calentado Radialmente	99
Figura 90. Variación de la temperatura en función del radio del suelo, calentado Radialmente	100
Figura 91. Variación de la temperatura en función del radio del suelo calentado Radialmente	100
Figura 92. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Telzone Rojo	108
Figura 93. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Peat Moss	108
Figura 94. Distribución de temperaturas en el intercambiador de calor	112
Figura 95. Razón de transferencia de calor contra el diámetro de la fibra de vidrio	116
Figura 96. Componentes del transportador de tornillo sinfin	119
Figura 97 Dimensionamiento del transportador de tornillo sin fin	120
Figura 98. Dimensionamiento del intercambiador de calor de 2500 mm de longitud	121
Figura 99. Dimensionamiento del intercambiador de calor de 3000 mm de longitud	122
Figura 100. Sistema de aplicación de agua caliente	123
Figura 101. Sistema de aplicación vapor de agua	123

Figura 102. Sistema de aplicación aire caliente	124
Figura 103. Variación de temperatura del sustrato y caloportador en función de su recorrido dentro del intercambiador: (a) tezontle rojo, (b) sustrato peat moss	127
Figura 104. Variación del coeficiente de transmisión de calor en el recorrido del suelo por el intercambiador	131

I. INTRODUCCIÓN

Los suelos y sustratos utilizados en la producción viverística en invernadero, tanto en horticultura como en la producción de plantas ornamentales o forestales, pueden albergar una gran cantidad y variedad de organismos que encuentran en él condiciones de vida favorable. 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. Estos agentes patógenos pueden actuar sobre las plantas en diversas fases de su desarrollo; 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 (Bruton, 1998). Este problema es de vital importancia en la agricultura moderna, donde se tiende en muchas ocasiones al monocultivo intensivo, sobretodo bajo invernadero donde se prevén condiciones ambientales particulares (humedad relativa, temperatura, etc.) que resultan muy favorables para el desarrollo de algunos patógenos. En un invernadero los patógenos del suelo entran principalmente por el agua de riego, también por restos adheridos a la maquinaria empleada para preparar el sustrato o al calzado del personal que labora dentro del invernadero, aunque en ocasiones pueden entrar con el polvo arrastrado por el aire entrante por puertas y ventanas.

Por las condiciones favorables existentes en las plantaciones, las poblaciones de patógenos de los sustratos agrícolas tienden a incrementarse cuando éstos no son renovados ni desinfectados (Jarvis, 1998). 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 y economía los métodos más utilizados en los últimos 50 años han sido los fumigantes químicos, principalmente el Bromuro de Metilo. Otros productos químicos muy empleados son mezcla de bromuro de metilo y cloropicrina, metan-sodio, dazonet, y 1,3 dicloropropeno (Aloise, 2001, Boodley, 1996; Nelson, 1998). La utilización generalizada de los métodos químicos ha ocasionado una serie de problemas ambientales, en la salud y en la sostenibilidad del suelo agrario (Braun y Supkoff, 1994; Minuto, 1999). 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 agraria, ya que estos, en ocasiones, dejan residuos contaminantes en el suelo, a veces peligrosos para la salud, y pueden ser de elevada persistencia (Gehring, 1991).

En la actualidad existe una gran diversidad de métodos físicos utilizados para la desinfección del suelo a campo abierto y sustratos agrícolas. El equipo empleado para cada uno varía de acuerdo a la naturaleza de cada método. 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 (Gehring, 1991; Velázquez y Gracia, 2005):

- Térmicos
- Mecánicos
- Eléctricos.

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 inicialmente se empezaron a desarrollar por Koch y Pasteur en 1859 en su búsqueda de técnicas de control bacteriológico (Sykes, 1958) y, posteriormente de manera más intensiva se empezaron a estudiar en los años 30 del siglo XX, al descubrir que con el calor las proteínas de los organismos se coagulaban y se inactivaban las enzimas (Newhall, 1955). Pero realmente el desarrollo de los tratamientos con calor se produce en los años 50, cuando diversos trabajos realizan la determinación de los *puntos térmicos letales* “death thermal points” de patógenos, nemátodos, insectos, y virus, temperatura a partir de la cual dichos organismos quedan destruidos si ésta se mantiene el tiempo suficiente. (Baker *et al.*, 1956; Walls, 1992; Nelson, 1998, Jordá *et al.*, 2002, Velázquez *et al.*, 2003).

Los métodos térmicos más estudiados en campo abierto han sido: la solarización, la llama directa, la radiación con infrarrojos, microondas y la utilización de vapor (Velázquez *et al.*, 2008). 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. El método consiste en un amontonamiento del material a desinfectar y la cubrición del mismo mediante un toldo plástico. Para introducir el vapor por el material se utilizan lanzas acopladas a calderas de elevada potencia; es

necesario esperar varias horas para que la desinfección sea culminada. Posteriormente se puede introducir el material en las bandejas para la siembra de plantas hortícolas en invernadero, que una vez desarrolladas serán trasplantadas a campo abierto. El mismo proceso también se realiza utilizando grandes autoclaves, donde el vapor es introducido por conducciones fijas a alta presión. No obstante, la utilización de vapor presenta varios inconvenientes generalizados:

- La aplicación de vapor se realiza en estático, en operación aparte del ciclo de trabajo
- Precisa largos periodos de espera en la desinfección
- Es necesario un espacio de grandes dimensiones para realizar la desinfección
- Es necesario la instalación de calderas de elevada potencia
- El método no es totalmente efectivo. Existe una disminución significativa de la población de especies patógenas pero pueden volver a aumentar al poco tiempo.

Un método alternativo a la desinfección en estático con vapor es el uso de microondas en el tratamiento de bandejas de siembra de pocos centímetros de espesor (hasta 8 - 10 cm) circulando de forma continua a través de un módulo específico, el cual ha dado buenos resultados en la investigaciones (Rangelov, 2003; Minobe et. al., 2003, Velázquez y Gracia, 2004), sin embargo la capacidad de trabajo y el coste energético todavía resulta alto comparado con el tratamiento con vapor de agua.

Dados estos inconvenientes resulta interesante buscar alternativas que con el mismo principio de desinfección (aplicación de calor) se mejore la eficiencia y pueda incorporarse la desinfección a un tren de siembra automatizado. Para ello es necesario establecer modelos para el diseño de sistemas de desinfección del suelo o de sustratos agrícolas en continuo. Uno de los posibles medios de transmisión para este fin es la aplicación de calor mediante convección.

Aunado a los inconvenientes, ya mencionados, del tratamiento térmico con vapor de agua en estático, se tiene que en México la mayoría de los invernaderos tradicionales, con escasa tecnología para el manejo del cultivo y control climático, desinfectan el suelo o sustratos agrícolas con productos químicos, los más comunes el hipoclorito de sodio o bromuro de metilo. Y aquellos invernaderos que cuentan con tecnología de punta en el sistema de siembra, en los cuales la desinfección se lleva a cabo con vapor de agua o agua caliente lo hacen en estático.

El objetivo general de esta tesis ha sido realizar un análisis del comportamiento térmico de los sustratos agrícolas en su calentamiento por sistemas de convección en intercambiadores de calor para un proceso de desinfección en continuo. Estos intercambiadores tienen el fin de desinfectar por calentamiento un lecho de sustrato fluidificado circulando por tuberías que alimentarán un tren de siembra automatizado. Estas líneas actualmente comienzan con una tolva donde se deposita el suelo o sustrato. Mediante un dispositivo de tornillos sin fin bandejas alveolares son llenadas de sustrato donde se va a producir la siembra. Para ello pasan por una punzonadora que realiza un hoyuelo en cada uno de los alvéolos. Posteriormente la bandeja pasa por una sembradora automática que deposita un conjunto de semillas en cada alveolo. Un humidificador humedece el suelo de la bandeja y otro módulo cubre la semilla sembrada con nuevo sustrato. Finalmente, de forma automática, la bandeja preparada es conducida a una bancada del invernadero donde el operario la coge para depositarla en su lugar definitivo. Después de unos meses crecerá un pequeño cepellón que se venderá al agricultor para trasplantarlo al campo.

Cada operación está realizada por un módulo independiente que puede ser acoplado a la línea o no estar en ella. El proceso de desinfección estudiado, va dirigido al diseño de un módulo de desinfección acoplado entre la tolva de inicio de la línea y el módulo de llenado de las bandejas. El proporcionar un sistema de desinfección continuo, permitiría por un lado reutilizar sustratos, turbas o suelos ya empleados, mejorando la sostenibilidad del sistema agrícola, por otro, garantizar la calidad sanitaria de los cepellones comercializados para horticultura, y sobretodo, ahorrar tiempo en las operaciones de desinfección que actualmente se realizan en estático, previo a la entrada de material en la línea. Por lo tanto, el diseño de sistemas de desinfección del suelo o de sustratos agrícolas mediante tratamiento térmico en continuo, ya sea con agua caliente, vapor de agua o aire caliente, contribuirá a ser más eficiente y menos contaminante el proceso de desinfección.

II. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

En esta sección se pretende, por un lado, describir las tecnologías que se han investigado en la desinfección de suelos y sustratos hasta el momento, por otro exponer los principios físicos en los que se basa el calentamiento por convección utilizado en el presente trabajo para efectuar dicha desinfección en continuo.

II.1 Los sustratos y su desinfección

Los sustratos agrícolas son materiales que cumplen cuatro funciones:

- Proporcionan un soporte mecánico para sostener a la planta erecta
- Sirve como un depósito de nutrientes para las plantas
- Retiene el agua haciéndola disponible para la planta
- Debe proveer un intercambio de gases entre las raíces y la atmósfera exterior del sustrato

Algunos materiales pueden proporcionar las cuatro funciones pero no en el nivel requerido. En la caracterización de los sustratos se suelen distinguir tres tipos de propiedades: *físicas*, *químicas* y *biológicas*. La importancia del conocimiento de estas propiedades radica en que de ellas dependerá el manejo adecuado de la fertilización y del riego y por lo tanto, el éxito del cultivo. Por ejemplo, la arena proporciona un excelente soporte e intercambio gaseoso pero tiene insuficiente capacidad de retención de agua y nutrientes. La arcilla tiene una alta capacidad de retención de agua y nutrientes, y proporciona un excelente soporte para las plantas, pero debido a la cercanía de las partículas y la película de agua que las rodean se reduce el espacio poroso para el intercambio gaseoso (Burés, 1997). El dióxido de carbono que producen las raíces y los microorganismos se acumula y suprime la respiración reduciéndose el crecimiento de las plantas, el oxígeno no se puede difundir adecuadamente a través de la arcilla y por ello requieren acciones mecánicas de disgregación a través de labranza para aumentar la porosidad (Boodley, 1996; Ortiz-Cañavate, 1995). En hidropónia el agua es utilizada como sustrato, proporcionando los nutrientes, pero le falta capacidad para el intercambio gaseoso y soporte para las plantas. Por tanto, debe bombearse aire a ésta y las plantas se soportan por alguna estructura. Así los sustratos de invernadero típicamente contienen dos o más componentes para asegurar que se cumplan las cuatro funciones en cierto grado.

Las características del sustrato han de ser también distintas, según la finalidad para la que vaya a ser utilizado, tal como indica a continuación (Abad y Noguera, citados por Urrestarazu, (2000; 2004):

a) Semilleros; la germinación de las semillas requiere un sustrato de fácil preparación y manejo con bajo nivel de salinidad, que ofrezca la mínima resistencia al desarrollo de las raíces. Deben buscarse sustratos con textura fina, estructura estable y fluida, con elevada capacidad de retención de agua para que mantenga la humedad constantemente. No es necesaria elevada capacidad de nutrición.

b) Sustrato para crecimiento y desarrollo de la plantas; esto exige sustratos de textura media a gruesa, con una mayor capacidad de aireación, un buen drenaje, un nivel óptimo de retención de fertilizantes y una moderada capacidad tapón con objeto de controlar el pH.

c) Enraizamiento de estacas; el medio de enraizamiento desempeña tres funciones: mantener la estaca vertical durante el periodo de enraizamiento; proporcionar humedad y permitir la penetración de aire a la base de la estaca.

Para estas finalidades se tienen diferentes tipos de sustratos:

- Sustratos minerales naturales: Arena y grava, rocas volcánicas
- Sustratos minerales tratados: Perlita, vermiculita, arcilla expandida, lana de roca
- Sustratos orgánicos sintéticos: Espuma de poliuretano
- Sustratos orgánicos naturales: Turba, fibra y polvo de coco

Una vez utilizados, todos ellos presentarán una población biótica que puede proporcionar problemas en el siguiente cultivo. En realidad no existen patologías exclusivas de los cultivos sin suelo. Pero si es cierto que las especiales circunstancias microclimáticas y ambientales en las que se desarrollan los cultivos sin suelo arrojan una especial problemática fitopatológica (Tello, 1984, citado por Urrestarazu, 2000). Las principales patologías que aquejan este tipo de producción vienen causados por:

- **Hongos**, ya sean Oomicetos, Zygomycetos, Azcomycetos y *Basidiomicetos*; parásitos transmisores de graves virosis. Géneros conocidos en horticultura por sus acciones parasitarias son: *Alternaria*, *Stemphyllum*, *Cladosporium*, *Cercospora*, *Thielaviopsis*, *Fusarium*, *Verticilium*, *Sclerotinia*, *Botrytis*, *Phoma*, *Phomosis* y *ascochyta*.
- **Bacterias**, Tello (1984) citado por Urrestarazu (2000), indica que en horticultura interesan 4 grupos genéricos: *Corynebacterium*,

Pseudomonas, *Xanthomonas*, y *Erwinia*. Producen enfermedades vasculares transmitidas a las semillas. Producen podredumbres blandas a órganos carnosos de plantas (*E. Carotovora* y *E. Cribisantemi*). Otras tienen una acusada especificidad parasitaria (*E. Tracheiphila*). Pueden ser extremadamente peligrosas polífagas (*E. Herbicola*).

- **Micoplasmas:** Microbios que se sitúan en el floema de las plantas, originando anomalías en los tejidos liberianos. Los síntomas que produce son llamativos: hipertrofia del cáliz, verdeamiento y/o atrofia de pétalos, esterilidad, retorno al estado foliar de los carpelos, ramificación anormal. Se transmiten, en general, por cicádulas (Tello, 1984, citado por Urrestarazu, 2000). Messiaen (1995), menciona que las hipertrofias foliares de la berenjena son causadas por el **Stolbur**.
- **Virus:** Se componen de un filamento de ácido nucleico, portador de una información genética que les permite cambiar, en su provecho, el metabolismo celular del hospedador. Por ejemplo, el **Mosaico del tabaco** virus o **TMV**, son muy conocidos por su gran rapidez de afección y enorme deterioro de la planta que le lleva no sólo a su improductividad sino también a su muerte.
- **Nemátodos.** Son pequeños gusanos provistos de un estilete bucal que les permite picar las células y absorber su contenido. Pueden, en forma de parasitar, agruparse en ectoparásitos, semi-endoparásitos y endoparásitos (Tello, 1984, citado por Urrestarazu, 2000).

La **desinfección del suelo** es una práctica agrícola que tiene como finalidad eliminar, o al menos reducir, los organismos parásitos de las plantas cultivadas que existen en el suelo (Lorente et al., 1998). En este mismo sentido Díaz *et al.* (2001), menciona que la finalidad de la desinfección de suelos agrícolas es la de exterminar los agentes patógenos (nemátodos y hongos: *Phytophthora*, *Phytium*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, etc.) que afectan a los cultivos, mermando sus cosechas e incluso en muchos casos acabando con la vida de las plantas. Los tratamientos del terreno destinados a la lucha contra la microfauna o contra la macro y microflora se denominan generalmente como desinfectantes (Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, 1999).

La esterilización parcial del terreno y de los sustratos de cultivo representa un papel fundamental en el programa de mejora de las condiciones sanitarias de los cultivos en general, pero es, en la mayor parte de los casos, indispensable para los cultivos hortícolas y florales en ambiente protegido (Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, 1999). Un sustrato libre de

patógenos, insectos, y semillas de malas hierbas es una condición necesaria para que pueda desarrollarse el cultivo con éxito. Así pues, con el fin de garantizar el estado sanitario de los sustratos, o siempre que se desee reutilizar un material tras un cultivo, será necesario proceder a su desinfección (Burés, 1997). Estas operaciones suponen un costo importante en la producción en invernadero.

De acuerdo con Lorente *et al.* (1998), la desinfección del suelo debe realizarse antes de implantar el cultivo puesto que, incluso con las sustancias desinfectantes menos herbicidas, causaríamos importantes daños a las plantas. Si se trata de desinfección química, una vez aplicado el producto, se debe respetar los plazos de seguridad marcados por el fabricante antes de realizar la siembra. Por otro lado, MEA (1999) menciona que para un mayor control la desinfección del suelo se debe realizar después de la aplicación de abono orgánico.

La desinfección del suelo y de los sustratos puede llevarse a cabo por diversos métodos (Ortiz-Cañavate, 1980; Gracia y Martín-Portugués, 1983; Worf, 1990; Walls, 1992; Hall, 1996; Boodley, 1996). Los procedimientos empleados para la desinfección del suelo y de los sustratos son:

- Métodos mecánicos, basados en la escarda y trituración a través de dispositivos de corte
- Métodos térmicos, como aplicación de llama, radiación solar, radiación electromagnética o vapor
- Métodos químicos empleando productos químicos fumigantes

Los métodos de desinfección más utilizados son los basados en el uso de productos químicos, fumigantes (Burés, 1997; Alpi y Tognoni, 1999). Secundariamente, Boodley (1996) menciona que los métodos físicos más comúnmente usados en invernaderos como alternativa a la fumigación son la pasteurización con vapor de agua, pasteurización eléctrica aplicada a lotes en estático. También Jarvis (1997) menciona como medios para la esterilización del suelo y sus sucedáneos la esterilización por vapor, pasteurización, esterilización con vapor por depresión, esterilización de la lana roca con vapor, compostaje, solarización, calefacción dieléctrica, radiación con rayos gamma y fumigación. Para el caso de la esterilización del agua en las soluciones hidropónicas los medios son: cloro y otros halógenos, ozono, ultrafiltración, radiación ultravioleta y esterilización por el calor.

Los métodos de desinfección de los suelos y sustratos en su aplicación pueden tener diversos riesgos o efectos desfavorables, bien sobre la fertilidad, al afectar a la estructura de los agregados, bien sobre sus defensas

naturales, al afectar a toda la vida microbiana, o bien produciendo residuos tóxicos nocivos en el medio ambiente. El resultado final de la esterilización parcial del terreno debe valorarse como una combinación de efectos favorables y desfavorables. La elección del método y los criterios de aplicación deben ser, en cualquier caso, dependientes de las condiciones particulares (Alpi y Tognoni, 1999).

Diversos factores influyen los resultados en la desinfección del suelo y de sustratos con productos químicos. Los más importantes son los siguientes: La textura, humedad, temperatura y contenido de materia orgánica.

- a) Textura y composición mecánica del suelo o de sustratos. Lorente *et al.* (1998), reporta que las arcillas presentan capacidad para la retención de los pesticidas. Los suelos arcillosos absorben el doble de fumigante que los suelos arenosos, esto se debe al poder atrayente que ejercen las partículas de arcilla sobre el fumigante. En este sentido Worf (1990), menciona que los fumigantes penetran y se distribuyen mejor en suelos arenosos y que los suelos pesados responden pobremente.

Cuando el vapor de agua se confina mediante láminas de vaporización sobre la superficie del suelo penetra y se distribuye mejor en suelos arcillosos que en suelos arenosos. Pero cuando se aplica mediante tubos de drenaje ubicados a 60 cm de profundidad asciende y se distribuye mejor en suelos arenosos y francos arenosos que en suelos arcillosos (Runia, 1983).

- b) Temperatura del suelo y de sustratos. La mayoría de los productos son poco operativos a temperaturas por debajo de los 10 °C. En temperaturas muy altas, el gas se distribuye mejor y la acción desinfectante es más efectiva. En relación con lo anterior la temperatura para la fumigación del suelo, está comprendida entre 8 y 25 °C, estos límites se han establecido por la respuesta fisiológica del insecto, ya que siendo los insectos de sangre fría, son casi inactivos a temperaturas inferiores a la de 8 °C y, las temperaturas superiores a 25 °C, favorecen las pérdidas del fumigante por volatilización (Lorente *et al.* 1998). En este sentido Worf (1990), menciona que los fumigantes trabajan mejor cuando la temperatura del suelo o del sustrato se encuentra entre 15 y 26 °C.
- c) Humedad del suelo y de sustratos. Según Lorente *et al.* (1998), durante la fumigación química o con vapor la humedad del suelo debe estar como máximo a capacidad de campo, puesto que una excesiva cantidad de agua en un suelo impide la penetración del producto. Incluso con productos que se aplican disueltos en agua, es mejor que el suelo

presente la mayor sequedad posible, puesto que cuanto mayor sea la porosidad llena de aire, mejor penetración tendrá el producto. En algunos casos de fumigación del suelo, su contenido de humedad deberá estar comprendido entre los límites de 5 a 15% sobre la base de suelo seco.

- d) Materia orgánica del suelo y de sustratos. Es importante, también, tener en cuenta el porcentaje de materia orgánica de un suelo, puesto que ésta tiene un efecto de retención de los fumigantes. En suelos extremadamente orgánicos, es mejor aumentar en unos días los plazos de seguridad prescritos por el fabricante (Worf, 1990; Lorente *et al.* 1998).

Uno de los problemas importantes de la introducción de sustratos en los cultivos sin suelo es, el drenaje de las disoluciones nutritivas relativamente concentradas sobre todo cuando se elimina nitrógeno y fósforo principales contaminantes hacia corrientes y ríos o agua subterránea (Peter, 1991, citado por Urrestarazu, 2000).

Según Bejarano (2000), el uso continuo de plaguicidas disminuye la diversidad biológica del suelo, haciendo a las plantas más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades. Aunado a lo anterior algunos fumigantes como el bromuro de metilo, ampliamente utilizado en la desinfección del suelo, destruye la capa de ozono que envuelve a nuestro planeta y que sirve de filtro a las rayos ultravioleta de la radiación solar para proteger tanto a los seres humanos como a las plantas y los animales (Díaz *et al.*, 2001). Además después de su aplicación, con el fin de reducir los niveles de bromuro y de otras sales liberadas, es normalmente necesario lavar el suelo con agua a razón de 25 – 50 l m⁻², lo que supone considerables problemas medioambientales. Por esta razón, algunos países prohíben la utilización de bromuro de metilo por su influencia en la salud humana (Van Leewen y Sangster, 1987, citados por Jarvis, 1998).

II.2 Aplicación de calor seco con flama

La aplicación de calor seco al suelo o a los sustratos mediante llama tiene como objetivo aumentar su temperatura lo suficiente para provocar la vaporización del agua, destruyendo la flora microbiana que pudiera resultar nociva para el desarrollo de los cultivos (Gracia y Martín-Portugués, 1983; Walls, 1992; Hall, 1996). El punto de muerte térmica de los patógenos se alcanza cuando se consigue la coagulación de las proteínas o la inactivación de sus encimas. Para erradicar los patógenos del suelo y sustratos Runia (1983; Runia, 2000) y EPA (2002) recomiendan mantener una temperatura

de 70°C, Nelson (1998) recomienda 71°C por 30 minutos, Langhans (1990) recomienda temperaturas de 80°C, Hall (1996); French y Hebert (1997) 82°C, Boodley, (1996) 84 °C por 30 minutos. Para erradicar virus la temperatura debe mantenerse entre 85 y 100 °C (Runia, 2000); Hall (1996) recomienda de 94 a 100 °C, Bartok (1994) temperaturas entre 71 a 82°C.

El punto de muerte térmica de los distintos patógenos del suelo o del sustrato depende de su etapa de desarrollo y etapa de crecimiento. En las Tablas 1 y 2 se presentan los puntos de inactivación térmica de las enfermedades y plagas más importantes.

La llama puede aplicarse de forma directa o bajo una lámina metálica que se sitúa cercana a una capa delgada de suelo (Robledo y Martín, 1988; Walls, 1992). Existen dispositivos estáticos o continuos que utilizan este principio. En las Figuras 1 y 2 se muestran ejemplos donde el suelo se coloca sobre una plataforma y se calienta desde la parte inferior. El sustrato se debe humedecer y remover constantemente para homogenizar la temperatura (Hall, 1996, French y Hebert, 1997). Un suelo poco húmedo tiende a formar terrones pegajosos, y un suelo seco tiende a quemarse destruyendo su estructura (Hall, 1996). El combustible utilizado para producir la llama puede ser leña, carbón vegetal, gasóleo o gas natural. La cantidad de material a quemar depende de la profundidad a la que debe alcanzarse la temperatura deseada. El principio de transmisión del calor en estos sistemas es básicamente por conducción.

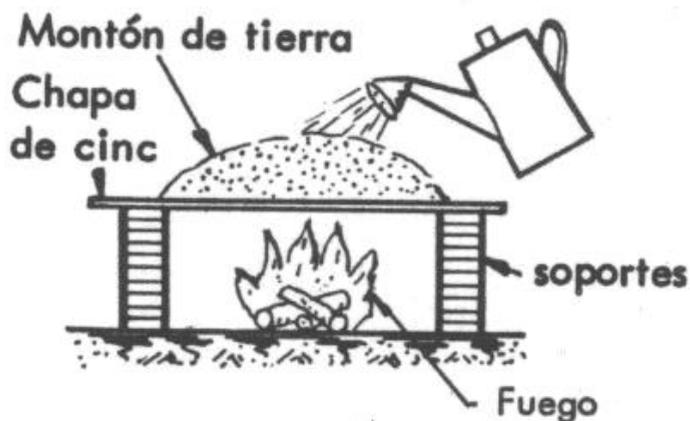


Figura 1. Esterilización del suelo mediante leña o carbón. (Robledo y Martín, 1988)

Tabla 1. Inactivación térmica de las enfermedades y plagas más importantes

Enfermedad	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición (min)	Referencias (a)
La mayor parte de las bacterias	60 – 70	10	1
Bacterias termotolerantes	90	30	2
Botrytis cinérea	55	15	1
<i>Cylindrocaron destructans</i>	50	30	2
Didymella lycopersici	50	30	2
Fusarium oxysporum			
<i>f. sp dianthi</i>	60	30	2
<i>f. sp. Gladioli</i>	57	30	1
Phialophora cinerescens	50	30	2
<i>Phytophthora cryptogea</i>	50	30	2
<i>Pythium sp</i>	53	30	2
<i>P.ultimum</i>	46	20 – 40	1
	50	30	2
<i>Rhizoctonia sp</i>	52	30	1
	53	30	2
<i>R. solani</i>	53	30	2
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	50	5	1
<i>Sclerotium rolfsii</i>	50	30	2
<i>Thielaviopsis basicota</i>	48	30	2
<i>Verticillium albo-atrum</i>	53	30	2
<i>V. dahliae</i>	58	30	2
La mayor parte de los hongos patógenos	60	30	1
La mayor parte de los actinomicetos	90	30	1
Nematodos foliares	49	15	1
<i>Anguillulina dipsaci</i>	56	11	1
<i>Heterodera marioni</i>	48	15	1
<i>Meloidogyne incógnita</i>	48	10	1
<i>Pratylenchus penetrans</i>	49	10	1
La mayor parte de los virus	100	15	1
Insectos y ácaros	60-70	30	1
Gusanos, babosas y ciempiés	60	30	1
La mayor parte de las malas hierbas	70 – 80	15	1

(^a) Referencias: 1 Baker y Roistacher (1957a); 2, Bollen (1969b), citados por Jarvis, 1998.

Tabla 2. Temperaturas necesarias para erradicar plagas del suelo (Bartok, 1994).

Microorganismo	Temperatura		Tiempo de exposición (min)
	(°C)	(°F)	
<i>Phythium</i> y <i>Phytophthora</i>	46,11	115	30
Nemátodos	48,88	120	30
Gusanos, babosas, ciempiés	57,22	135	30
Mayoría de las bacterias patógenas	60	140	30
Insectos del suelo	71,11	160	30
Mayoría de semillas de malas hierbas	82,22	180	30
Pocas semillas resistentes de malas hierbas y virus de las plantas	101,66	215	30

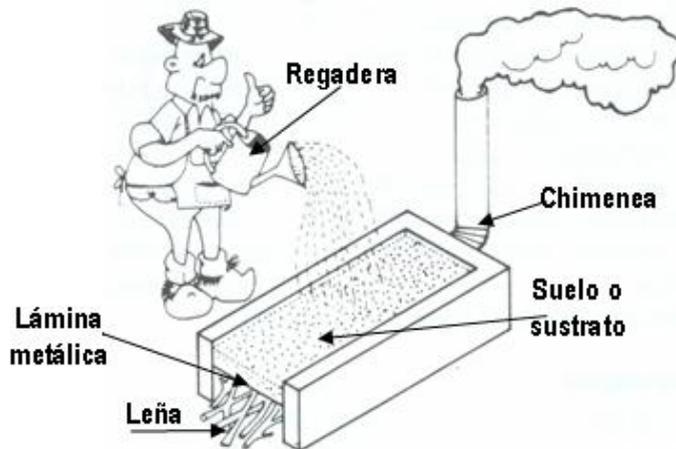


Figura 2. Equipo para esterilización del suelo con leña o carbón (Messiaen et. al., 1995).

En semilleros, existen equipos continuos en los que el suelo circula por una cinta móvil haciéndose pasar por la lámina caliente. Otros equipos consisten en tanques metálicos rotativos donde el suelo o sustrato gira calentándose. La llama puede situarse en el interior del cilindro (Walls, 1992). El punto de calentamiento también puede ubicarse exteriormente en la parte inferior o superior del tanque.



Figura 3. Tanque rotativo esterilizador de suelo o sustrato
Fuente: FMT, 2002.

Las ventajas de los equipos que utilizan calor seco con llama es que son equipos sencillos, fáciles de construir, y de bajo costo; la fuente de energía puede provenir de fuentes renovables como biomasa, biodiesel, gas sintético o biogas. Como desventajas debe citarse que son equipos diseñados y construidos para tratar pequeñas cantidades de suelo; es difícil controlar la temperatura, sobre todo cuando el componente sobre el cual se ubica el suelo permanece fijo.

II.3 Aplicación de calor seco con resistencia eléctrica

Ortiz-Cañavate (1995), menciona equipamiento que emplea resistencias eléctricas para tratar sustratos para semilleros antes de que sean colocados en el lugar de cultivo, a esta forma de trabajo se le denomina “tratamiento aparte” y se recomienda para el establecimiento de algunos cultivos hortícolas delicados. En la Figura 4 se muestran equipos de diferentes capacidades basados en este principio; todos ellos son de tratamiento en estático (Pierce, 1977; Walls, 1992; Siebring, 2003).



Figura 4. Esterilizadores eléctricos (Siebring, 2003)

Estos equipos presentan la ventaja de que no es corrosivo, su diseño del equipo es simple y sencillo (French y Hebert, 1997; Walls, 1992). No obstante, presenta las desventajas de que sólo se pueden tratar pequeñas cantidades de suelo o sustrato; es menos efectivo que el calor húmedo (French y Hebert, 1997); requiere de tiempos más largos y/o altas

temperaturas; resulta más difícil el control de la temperatura que con vapor de agua.

II.4 Pasteurización con vapor

Consiste en la aplicación de calor mediante vapor de agua para calentar el suelo y los sustratos para destruir los organismos patógenos y semillas de malas hierbas. Es un método seguro y no tóxico para las plantas (Rosello y Martín, 1988; Hudson *et al.*, 1990; Walls, 1992; Burés, 1997; French y Hebert, 1997; Lorente *et. al.*, 1998; Boodley, 1996; EPA, 2002).

Gracia y Martín-Portugués (1983), mencionan que para aplicaciones de 10 minutos, las temperaturas letales para la mayor parte de bacterias quedan por debajo de 70 °C; para hongos 80 °C; para semillas de malas hierbas 85 °C; virus del tomate 92 °C, y nematodos 55 °C. Alpi y Tognoni (1999), mencionan que en la práctica normal de esterilización parcial con vapor, la temperatura, en general, se suele fijar a 100°C durante más de 15 minutos, con ello se elimina completamente, con la única excepción de algunas bacterias esporíferas.

En la aplicación de calor al suelo y sustratos mediante vapor de agua, para incrementar la temperatura de 1 kg de agua de 10°C a 100°C se requieren aproximadamente 1500 kJ, la energía se libera cuando se alcanza el punto de condensación, es decir cuando el vapor de agua pasa al estado líquido.

a) Preparación del suelo en campo

Para una correcta pasteurización en campo el suelo se debe roturar, mezclar y desmoronar perfectamente bien (Boodley, 1996). Gracia y Martín Portugués, (1983) y NEM/PSTEAM (2003) recomendaron la siguiente preparación del terreno:

1. Remover las raíces y residuos de los cultivos previos, principalmente cuando los cultivos previos han presentado síntomas de alguna enfermedad o efecto de plaga. Si los cultivos previos no presentaron los síntomas mencionados y son abundantes, se pueden picar con un paso de rastra o fresadora, después se puede realizar un subsolado o una aradura.
2. Labor de subsolado, con la finalidad de romper las capas restrictivas del perfil del suelo. La profundidad de trabajo puede variar de 60 a 90 cm.
3. Aradura. Ésta labor se puede realizar con un arado de discos o un arado de vertedera. Se debe realizar con la finalidad de mezclar y desmoronar el suelo a una profundidad de 25 a 30 cm.

4. Rastreo. Labor de labranza que se lleva a cabo con uno o dos pasos de rastra de discos, la profundidad de trabajo puede variar de 15 a 20 cm.
5. Labor de fresa. Se lleva a cabo con un paso de arado rotativo a una profundidad de 25 a 30 cm.

Según se presenten las condiciones del terreno en campo, se pueden realizar en forma secuenciada los puntos 1 a 4 o bien 1, 2, y 5.

6. Dejar menos de 2% de materia orgánica fresca.
7. Testear la temperatura a 30 cm de profundidad.
8. Obtener la humedad óptima a 150 cm de profundidad. Un sustrato excesivamente seco dificulta conducción del calor y causando que el sustrato se caliente más lentamente, sin embargo la porosidad mejora el movimiento del vapor. Es por ello que existe un límite tanto inferior como superior de la humedad para que el efecto desinfectante de la pasteurización sea óptima.

b) Preparación del sustrato en invernadero

Aloisi (2001) y Boodley (1996), dan las siguientes recomendaciones:

1. Dejar libre de residuos de cultivos el sustrato. Por regla general el sustrato que se va a pasteurizar debe estar bien preparado y libre de residuos de cultivos.
2. Mezclar, desmoronar y aflojar el sustrato. En invernadero el sustrato se debe aflojar y se debe dejar libre de terrones o agregados grandes antes de la pasteurización. Un suelo flojo facilita la difusión del vapor de agua. Sí el sustrato se encuentra en un bancal ésta labor se hace manualmente o con arado rotativo. Si la pasteurización se realiza con vapor de agua éste tiene dificultades para penetrar los agregados y llevar la temperatura al nivel deseado (principalmente cuando se tiene suelo como sustrato). Por lo tanto, los patógenos pueden permanecer en el sustrato y causar un problema más tarde (Boodley, 1996; Nelson, 1998). Dentro del sustrato el calor se mueve más rápidamente en el espacio poroso por convección que por conducción de partícula a partícula. Los poros más grandes de un sustrato flojo facilitan el movimiento del vapor de agua y acortan el tiempo requerido para pasteurizar el sustrato que se encuentra en el bancal o recipiente (Nelson, 1998).
3. Humedad del sustrato. La adición de agua aumenta la tasa de pasteurización, pero hay un nivel óptimo más allá del cual nuevamente el proceso de pasteurización se vuelve otra vez lento. El exceso de agua en el sustrato consume energía en el aumento de su temperatura por ello

retrasa el proceso de pasteurización y se incrementa el costo. Por regla general, el sustrato se debe humedecer hasta el nivel deseado en el tiempo de siembra o trasplante del cultivo. El suelo debe estar a capacidad de campo y el sustrato cerca de la capacidad del contenedor, es decir ni mojado ni seco, la siembra o trasplante se realizan cuando el suelo o sustrato está en este nivel de humedad.

4. Erradicación de semillas de las malas hierbas
Con la finalidad de erradicar las malas hierbas, el sustrato se debe humedecer una o dos semanas antes de la pasteurización. Tan pronto como las semillas inician el proceso de germinación, al humedecerse, éstas son fácilmente erradicadas a temperaturas típicas para pasteurización.
5. Incorporación de fertilizantes y enmiendas físicas
Fertilizantes tales como caliza, superfosfato, trazas de micronutrientes y fertilizantes completos inorgánicos, se deben adicionar antes del proceso de pasteurización (Figura 5).



Figura 5. Mezcla manual de fertilizante con suelo antes de pasteurizar (Boodley, 1996)

6. Algunas herramientas que se utilizan en la preparación del sustrato también se ponen sobre el sustrato y bajo la cobertura antes de la pasteurización
7. Cobertura del sustrato.
El sustrato se debe cubrir con una cobertura de polietileno o lona (Figura 6) para retener el vapor de agua una vez que la temperatura se ha alcanzado. La cobertura se debe ajustar por sus bordes con algún peso (cadena, tubo etc.).

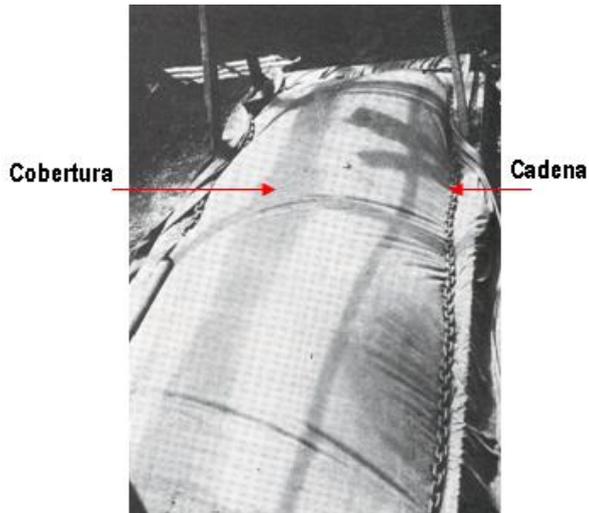


Figura 6. Empotrar los bordes de la cobertura con peso (Boodley, 1996).

Cuando el vapor de agua se libera de la caldera lo hace a baja presión, 0,35 a 1 kg cm⁻². Tan pronto como éste se libera dentro del sustrato a presión atmosférica cede su calor, difundiéndose en el volumen elevando la temperatura. La tasa de inyección debe ser alrededor de 88 kg h⁻¹ m⁻² de superficie del medio expuesta (Bartok, 1994). Las partículas del suelo tienen una capacidad calorífica de aproximadamente el 20% de la del agua. Por lo tanto cuanto más húmedo esté el suelo o el sustrato se requiere mayor cantidad de energía para llevar la temperatura inicial a la temperatura deseada. Este hecho indica que el suelo o el sustrato se debería secar antes de ser tratados, sin embargo en un suelo seco muchos de los patógenos entran en formas más resistentes y son más difíciles de erradicar; en un suelo con humedad apropiada el tratamiento con vapor resulta más efectivo (Langhans, 1990).

Cuando el vapor se propaga en el sustrato mediante tuberías perforadas enterradas o colocadas sobre la superficie, el vapor alcanza un volumen limitado cuya frontera se denomina banda de condensación (Figuras 7 y 8). Una caldera con capacidad de generación de vapor pequeña con respecto al volumen de suelo a tratar prolonga mucho el proceso de calentamiento en ciertas zonas, haciendo la distribución de temperaturas no uniforme. Una caldera con capacidad mayor a la requerida propicia que el vapor de agua no se contenga en el suelo, la banda de condensación puede superar el volumen del mismo existiendo un escape hacia el exterior a través de canales formados, haciendo el proceso ineficiente.

Si la fuente de vapor de agua está por arriba del suelo o sustrato, se debe hacer un drenaje que permita la salida del aire que se encuentra en los poros. Si el aire no puede salir o es lenta su salida, la banda de condensación no se mueve rápidamente y el proceso de calentamientos es más lento, perdiendo uniformidad la distribución de temperaturas. Si la banda de condensación se detiene (Figura 8) el resto del suelo se calienta por agua caliente formada por la condensación del vapor de agua. Si se hace una salida de aire en la base del bancal, la banda de condensación avanza hacia la base (Figura 9).

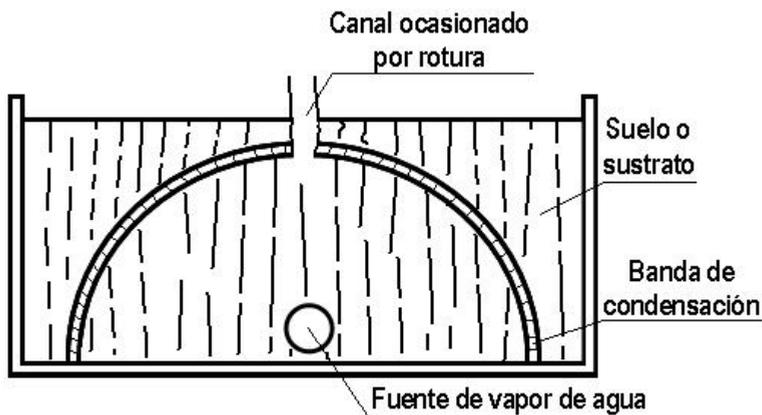


Figura 7. Proceso de aplicación de vapor de agua al suelo o sustrato mostrando un rompimiento (Langhans, 1990).

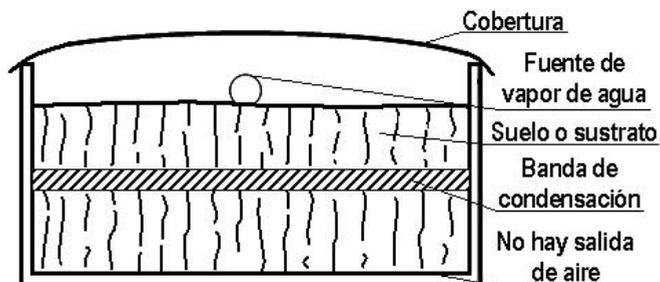


Figura 8. Bancal sin salida para el aire del suelo o sustrato (Langhans, 1990).

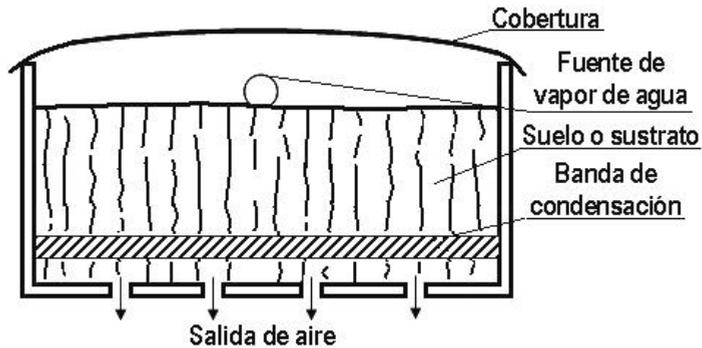


Figura 9. Banco con salidas para el aire del suelo o sustrato (Langhans, 1990)

II.4.1. Cálculo de la cantidad de calor y de vapor de agua

Para calcular la cantidad de calor y de vapor necesaria para un tratamiento de esterilización del terreno hay que tener en cuenta sus propiedades físico-químicas, además de la temperatura del suelo al principio y al final del tratamiento y la duración deseada en la operación (Alpi y Tognoni, 1999). En este mismo sentido Bartok (1994), y Burés (1997), indican que además es necesario conocer su humedad. La tasa de flujo de vapor necesario depende de que tan rápido se realice su mezcla con los distintos componentes del suelo y sean llevados a la temperatura deseada. En la mayoría de las ocasiones se tiene por experiencia. El flujo debe ser lo suficientemente grande sin que rompa o abra canales en el suelo, es decir, la banda de condensación debe ser continua (Langhans, 1990; Bartok, 1994). Para la mayoría de las aplicaciones es deseable 30 minutos de tiempo de calentamiento y 30 minutos de tiempo de contacto. La cantidad de vapor de agua necesario para diferentes mezclas de sustrato se da en el Tabla 3.

Tabla 3. Cantidad de vapor de agua necesario para tratar el sustrato (Bartok, 1994)

Sustrato	Vapor de agua a flujo libre kg m ⁻³	Vapor de agua aireado kg m ⁻³
Suelo	173,1548	101,007
suelo/turba/arena	120,246	70,544
suelo/turba/perlita	109,023	64,131
turba/perlita	155,518	91,387
Turba	179,568	104,213

Se asume: un suelo franco arcillo limoso, contenido de humedad a capacidad de campo, vapor saturado a 110 °C, vapor de agua aireado a 160 °f (71,11 °c), temperatura del suelo 60 °f (15,55 °c), aire a 70 °f (21,11 °c) y 50% de humedad relativa, 50% eficiencia de la caldera y sistema de conducción.

La cantidad de calor total requerido para cambiar la temperatura de una sustancia es proporcional a la masa de la sustancia y al cambio de temperatura, ecuación 1, (Wilson, 1996; Tippens, 1996).

$$Q_r = C \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde: Q_r - cantidad de calor requerido por kg de suelo para alcanzar la temperatura deseada, kJ; C - calor específico de la sustancia, kJ kg⁻¹ °C⁻¹; ΔT - diferencia entre temperatura inicial T_i y temperatura final T_f , °C.

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 sustituyendo en la ecuación 1 las ecuaciones 2 o 3 (Langhans, 1990; Burés, 1997).

$$C_m = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i \quad (2)$$

Donde: C_m - calor específico del suelo o sustrato por unidad de masa, kJ kg⁻¹ °C⁻¹; x_i - cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional; C_i - calor específico de cada material constituyente kJ kg⁻¹ °C⁻¹.

Si se desea expresar el calor requerido por unidad de volumen se calcula el calor específico volumétrico del suelo (ecuación 3), y se aplica la ecuación (4)

$$C_v = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i \cdot \rho_{bi} \quad (3)$$

$$Q_{sv} = C_v \cdot \Delta T \quad (4)$$

Donde: C_v calor específico volumétrico del sustrato $\text{kJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; x_i cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional; C_{vi} calor específico volumétrico de cada material constituyente $\text{kJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; ρ_{bi} densidad aparente de cada suelo o sustrato, kg m^{-3} .

El calor cedido por metro cubico de vapor vendrá definido por el paso del vapor a 100°C a líquido a temperatura de desinfección, 70°C aproximadamente, es decir, que corresponde al calor latente liberado (Q_{lat}) y a 30° de calor sensible aproximadamente.

$$Q_{vap} = Q_{lat} + C_{agua} \cdot \Delta T \quad (5)$$

El calor latente de vaporación del agua a presión atmosférica es aproximadamente 2500 kJ kg^{-1} .

La cantidad de vapor de agua necesario para incrementar de la temperatura inicial a la temperatura deseada una cantidad volumétrica o másica de un suelo o de un sustrato se calcula con las ecuaciones 1 y 5.

$$M_{vapor} = \frac{Q_r}{Q_{va}} \quad (6)$$

Donde: M_{vapor} - son los kg de vapor de agua requerido por kg de suelo; Q_r - cantidad de calor requerido, kJ kg^{-1} de suelo o de sustrato; Q_{va} - calor de vaporización del agua, kJ kg^{-1} de vapor de agua.

La eficiencia energética del proceso de desinfección con vapor suele ser del 50%, puesto que existen pérdidas de vapor que se condensa sin estar en contacto con el suelo. Esto influye en la potencia y cantidad de vapor a demandar al generador de vapor a utilizar.

El tiempo requerido para llevar el suelo o sustrato de la temperatura inicial a la temperatura deseada se obtiene con la ecuación 7.

$$TRT_{i-d} = \frac{Q_{tva}}{Q_{vc}} \quad (7)$$

Donde: TRT_{i-d} - tiempo requerido para llevar el suelo o sustrato de la temperatura inicial a la deseada, h; Q_{tva} - cantidad total de vapor requerido por cada desinfección, kg de vapor; Q_{vc} - cantidad de vapor generado por la caldera, kg de vapor por hora.

Q_{tva} se puede obtener con las ecuaciones 6 o 7. Se recomienda añadir entre 10 y 20 minutos a los tiempos TRT_{i-d} obtenidos (Burés, 1997).

De forma general los requerimientos de la caldera para alcanzar una temperatura de 80°C en 1 hora, prolongándose el tratamiento 30 minutos adicionales para mantener constante esa temperatura. Tras este tiempo, se cierra la emisión de vapor y se deja otra hora para enfriar el sustrato antes de que se pueda manejar. De tal modo que el tratamiento completo dura 2,5 horas.

Si se considera que la jornada de un día de trabajo es de 8 horas, se pueden pasteurizar dos volúmenes de suelo o sustrato al día. No es recomendable pasteurizar volúmenes de suelo o sustrato que sobrepasen la capacidad de la caldera. Una caldera con una capacidad de 250 kg de vapor de agua por hora, pasteuriza 8500 m³ de suelo (Langhans, 1990).

II.4.2 Métodos y equipos para aplicar calor húmedo

El volumen del suelo o del sustrato al cual se le va aplicar vapor de agua para su calentamiento y desinfección va a condicionar el sistema de distribución. A continuación se describen los más relevantes:

Parrilla Hoddesdon

Con la Parrilla Hoddesdon (Figuras 10 y 11), el tratamiento se realiza mediante tubos perforados, de una longitud aproximada de dos metros colocados a diferentes profundidades (normalmente se suelen poner a 2/3 del espesor a tratar); esta distancia se suele mantener entre cada tubo. Éstos, por lo general, se suelen disponer en una o más baterías de 4 tubos funcionando simultáneamente. Bartok (1994), indica que es el mejor sistema para aplicar calor con vapor de agua es usar politubos perforados enterrados a más de 30 cm bajo la superficie de la cama a tratar. Esto permite que la cama a tratar se

labore sin dañar los tubos, el vapor inyectado por el tubo asciende a la parte superior de la cama y proporciona un control uniforme en la misma.

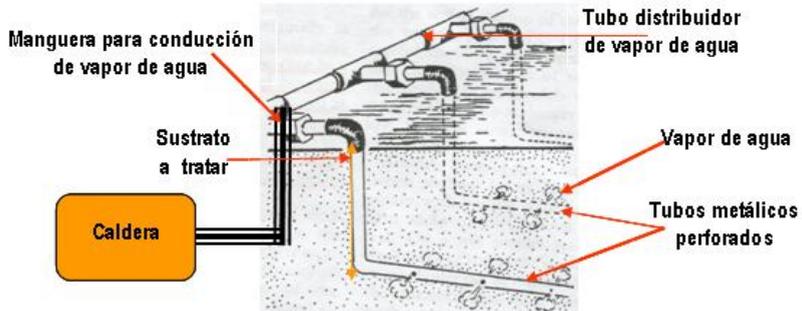


Figura 10. Parrilla Hoddesdon para desinfectar el sustrato (Walls, 1992).



Figura 11. Parrilla Hoddesdon y equipo auxiliar (Jarvis, 1998)

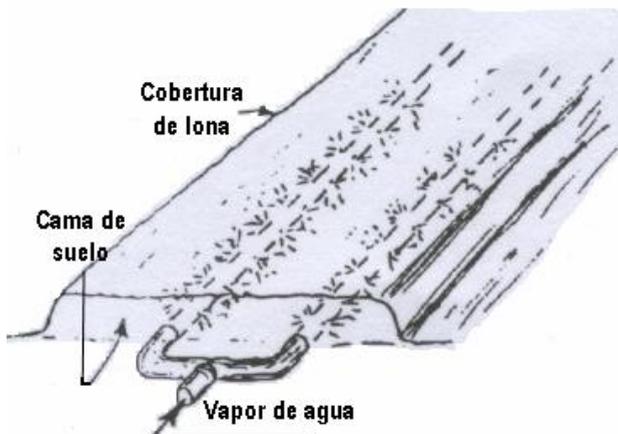


Figura 12. Sistema politubos perforados enterrados bajo la superficie de una cama (Bartok, 1994).

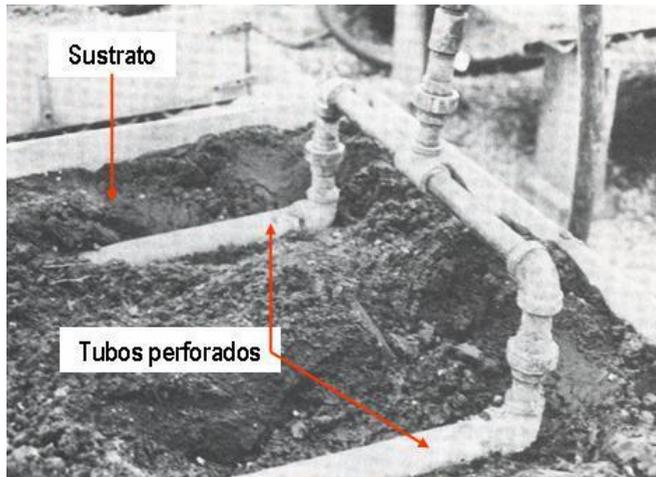


Figura 13. Sistema politubos perforados enterrados bajo la superficie de un bancal (Nelson, 1998).

Este sistema permite ser aplicado tanto en suelos como en camas o bancadas para la producción de hortalizas o flores y también pueden ser de una sola línea (Boodley, 1996; Nelson, 1998). La cama o la bancada deben contar con sistema de drenaje y se puede cubrir con una lona para mayor eficiencia y uniformidad del tratamiento.

El suelo o sustrato en A es dos veces la profundidad del suelo o sustrato en B. C es un tubo perforado enterrado en el sustrato. D conexión de E con C. F cobertura, retiene el vapor de agua

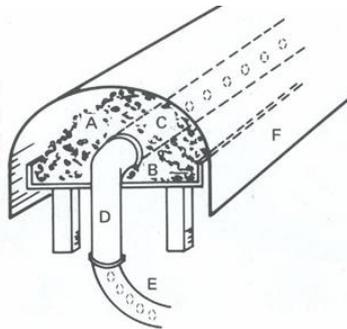


Figura 14. Sistema de un solo tubo enterrado bajo la superficie de un bancal (Boodley, 1996.)

Para la distribución de vapor se pueden utilizar tubos de cerámica o conductos de polipropeno ya instalados en muchos invernaderos y destinados para el drenaje de las camas y los bancales. La ventaja es que el sistema es permanente y fácil de usar y no se requiere de equipo especial excepto la cobertura requerida (Langhans, 1990).

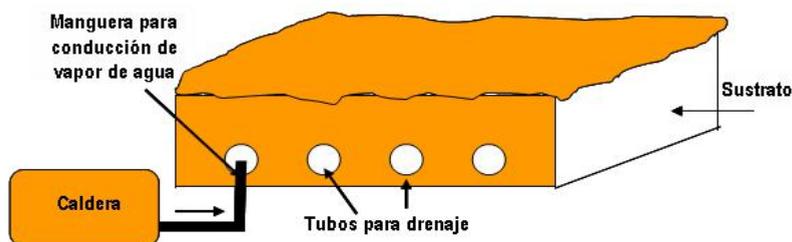


Figura 15. Sistema de tubos de drenaje (Ruina, 2000).

Como ventajas se puede citar que es un sistema muy eficiente para la erradicación de patógenos del suelo o del sustrato; permite tratar superficies relativamente grandes simultáneamente (varias docenas de metros cuadrados). Como desventajas debe tenerse en cuenta que requiere de bastante labor del sustrato para dejarlo mullido y que el tratamiento sea más eficiente; el costo de la inversión es alto.

Método de aplicación de vapor de agua mediante “aperos en parrilla”

Están constituidos por un esqueleto o armazón al que se le fijan puntales tubulares verticales perforados (Figura 16). Estos instrumentos montables y desmontables se deben emplear en terrenos uniformes y en condiciones de humedad bien controlada, sobre todo porque en el momento de la introducción, los puntales comprimen el terreno, lo que hace que la distribución sea muy irregular (Runia, 2000).

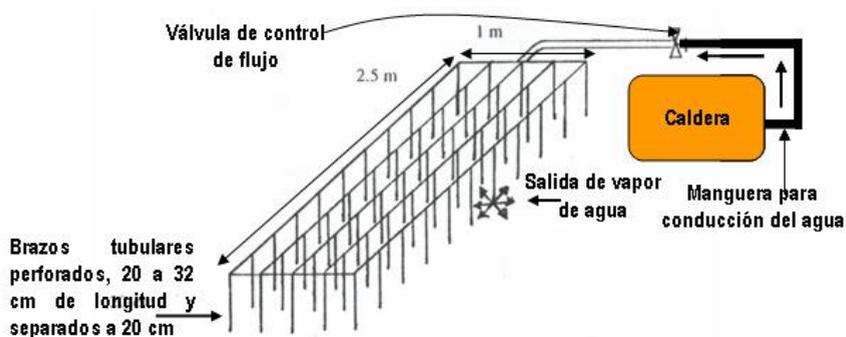


Figura 16. Parrilla con brazos tubulares (Runia, 2000)

Como ventajas resulta un equipo sencillo y requiere de menos laboreo que la parrilla convencional. Como desventajas requiere costes más altos de

inversión y labores de montaje y desmontaje del dispositivo en cada tratamiento.

Aplicación de vapor de agua bajo toldos

Según Gracia y Martín-Portugués (1983), la desinfección por calor húmedo o vapor de agua puede aplicarse tanto sobre montones de tierra destinada a semilleros como sobre el suelo de la parcela. A esta última aplicación Ortiz-Cañavate (1980), le denomina tratamiento *in situ* (Figura 17). Sobre una cama o un bancal se ubica una cobertura de plástico o de lona y el vapor de agua se inyecta bajo la cobertura (Figura 17). La difusión del vapor en profundidad se hace por el aumento de presión de superficie, necesitándose un suelo bien preparado, ni demasiado fuerte ni demasiado mullido. Los chorros de vapor de agua suelen salir a una temperatura de 110°C, a fin de evitar el sobrecalentamiento del suelo, ya que la temperatura máxima de éste no debe ser superior a los 90°C, impidiendo cualquier alteración química. El vapor de agua infla la cobertura, lo cual ayuda a una distribución plena sobre todo el bancal. El vapor penetra en el suelo. Algunas veces se incorpora un tubo perforado en la parte superior del suelo o del sustrato para aumentar la velocidad de distribución del vapor de agua. Como el aire del suelo es empujado por el vapor de agua, la cama o la bancada deben estar provistos de una salida de drenaje. Con este método se puede pasteurizar eficientemente un suelo o sustrato hasta una profundidad de más de 30 cm. En camas de suelo superficiales que no cuentan con un sistema de drenaje que permita la salida del aire, no se recomienda utilizar este método (Langhans, 1990; Bartok, 1994). Los mejores resultados se obtienen sobre suelos o sustratos bien desmenuzados y con vapor a elevada presión, de forma que afecte lo más rápidamente y en profundidad a la masa de terreno o sustrato que se está tratando (Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, 1999).

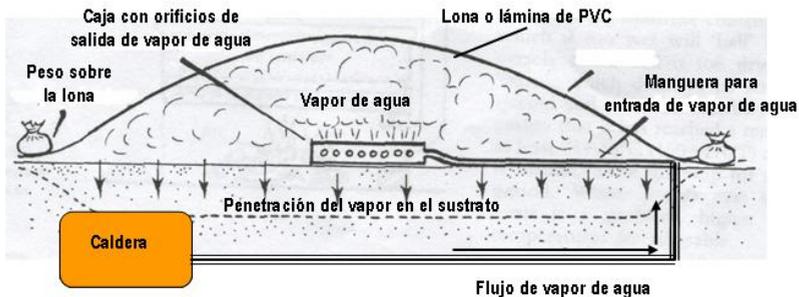


Figura 17. Equipo “a lona” para esterilización parcial del suelo o del sustrato (Walls, 1992)

Como ventajas cabe citar que es fácil de instalar y requiere de muy poco equipo especial; funciona bien en suelos arcillosos; la superficie a tratar puede ser de 75 a 95 m². Como desventaja decir que requiere periodos de aplicación de vapor de agua largos, para un volumen de suelo limitado. MEA (1999), indica que el calor aplicado mediante vapor de agua es el único medio para eliminar a la *Sclerotinia*, que es el hongo más difícil de controlar; en este caso se aplica vapor hasta obtener una temperatura de 90°C a una profundidad de 300 a 400 mm, y se le mantiene por lo menos durante una media hora.

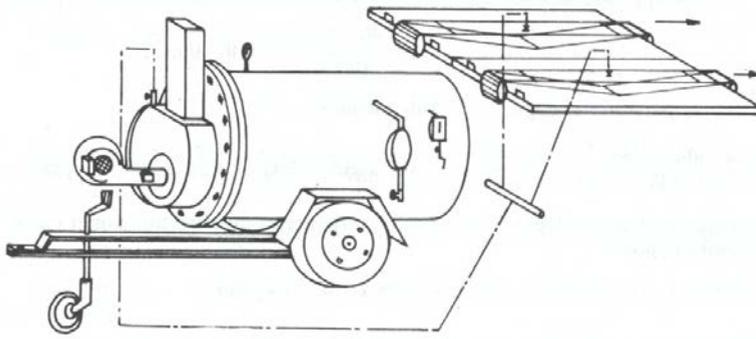


Figura 18. Equipo para la desinfección del suelo con vapor de agua presurizado (Ortiz-Cañavate, 1980)



Figura 19. Equipo "a lámina" de vaporización" (Jarvis, 1998).

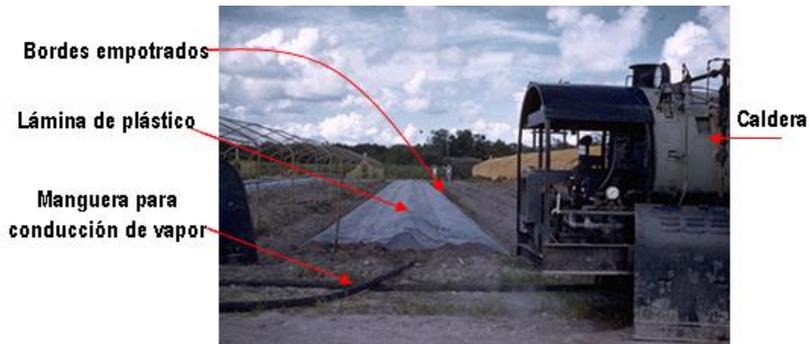


Figura 20. Lámina de plástico para vaporización (NEM/PSTEAM, 2003).

Como ventajas requiere menos inversión y es un procedimiento de inyección de vapor de agua al suelo más eficiente que el procedimiento con rastrillos y reja en forma de cuña (Gracia y Martín-Portugués 1983).

Equipos traccionados para aplicar vapor de agua

Rastrillos

Los rastrillos para aplicar vapor de agua (Figura 21) pueden ser jalados a través del suelo por una máquina estacionaria (Figura 22) o por una unidad autopropulsada la cual debe incluir una caldera para producir el vapor (Figura 23). Las púas en forma de cincel se separan 2,8 cm y cada una tiene una longitud unos 30 cm. El vapor de agua se distribuye por los conductos que van por detrás de cada púa. La desventaja es que el área entre las púas para algunos suelos no se calienta uniformemente. Si se reduce la separación entre las púas se puede dañar la estructura del suelo y se incrementa la carga que jala la maquinilla. Si se incrementa la cantidad de vapor de agua se pueden abrir canales de escape principalmente en las ranuras dejadas por las púas. Los rastrillos para aplicar vapor de agua funcionan bien en suelos arenosos (Langhans, 1990). El vapor de agua generado por la caldera se conduce hacia el conducto principal, el cual lo distribuye a los conductos de cada púa, las cuales lo incorporan al suelo a la profundidad de la cuchilla. La lámina para vaporización evita que el vapor de agua salga de la masa de suelo que se está tratando, consiguiendo con ello conservar una temperatura alta (71°C a 82°C) por 30 minutos. La velocidad de desplazamiento del rastrillo suele ser de 0,015 a 0,03 kilómetros por hora.

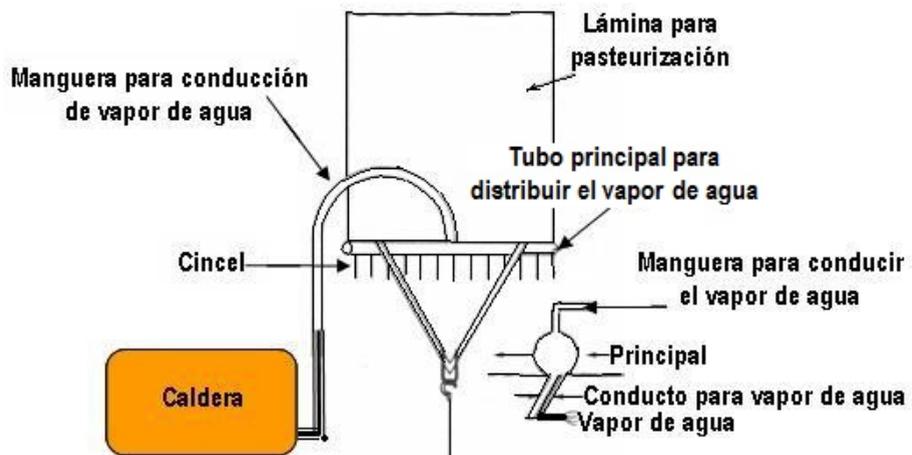


Figura 21. Rastrillo para aplicación de vapor de agua (Nelson, 1998).



Figura 22. Rastrillo jalado por una maquinilla (NEM/PSTEAM, 2003).



Figura 23. Rastrillo jalado por una máquina autopropulsada.
(NEM/PSTEAM, 2003).

La aplicación de calor mediante vapor de agua por medio de rastrillos, aún cuando se empezó a utilizar desde 1950, es una práctica de uso actual, pero no la mejor práctica (Bartok, 1994; Nelson, 1998).

Reja horizontal en forma de cuña

Consiste en una cuchilla horizontal de 1,5 m de ancho con forma de cuña, la cual es jalada a través del suelo (Figura 24). El vapor de agua es inyectado uniformemente al suelo a través de una ranura hecha en la parte posterior de la cuña. La reja en forma de cuña se mueve a través del suelo a una velocidad $0,018 \text{ km h}^{-1}$, dependiendo del volumen de vapor de agua, tipo de suelo, contenido de humedad y temperatura del suelo. La cobertura de plástico se arrastra detrás de la reja en forma que reduce la pérdida de calor y conserva la temperatura deseada en el suelo por 30 minutos. Se requiere de 9 metros de cobertura (Langhans, 1990). En relación con lo anterior Bartok (1994), menciona que tanto los rastrillos como las rejas horizontales se jalan lentamente a través de la cama de suelo por máquinas estacionarias o por un tractor. La profundidad es controlada por el ángulo y la longitud de los dientes, en la cuña por el ángulo de ataque y la longitud de los brazos. La uniformidad del tratamiento es buena. En este método se requiere de una caldera y un aireador móviles.

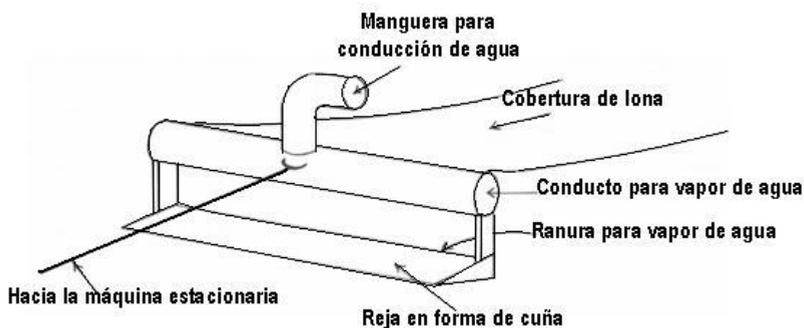


Figura 24. Reja en forma de cuña para aplicar vapor de agua (Bartok, 1994).

Como desventaja cabe citar que requiere de mayor energía para su desplazamiento que los rastrillos.

Injector de vapor acoplado a rejas de cultivador

Consiste de un cultivador al cual se le unen de 4 a 6 m de tubo flexible para aplicar el vapor (Figura 25). En este caso el suelo o sustrato es cultivado de 30 a 50 cm de profundidad, el vapor es aplicado por parcela alrededor de 15 a 20 minutos, lo cual depende de la velocidad de avance del inyector. Una lámina de vaporización cubre el suelo que es tratado. La temperatura alcanzada por la capa de suelo arriba de los tubos de vaporización es de 70°C. Este método es más efectivo sobre suelos arenosos. Es un método más adecuado para campo abierto que para invernaderos (Runia, 2000). Con este método, el vapor de agua se distribuye en los 2/3 de la profundidad del terreno o sustrato a tratar, mediante instrumentos de labor unidos a un cuerpo arrastrado a velocidad variable a lo largo del bancal. Después del paso del distribuidor conviene recubrir el terreno tratado con lámina de plástico para conservar el calor; la operación se puede simplificar aplicando al distribuidor un rollo de lámina de plástico para que se extienda automáticamente con el avance del equipo. Este método es más efectivo cuanto mejor está preparado el terreno y se tiene una buena condición de humedad del mismo. El tratamiento se debe aplicar en el periodo de la temperatura ambiental es elevada (Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, 1999).

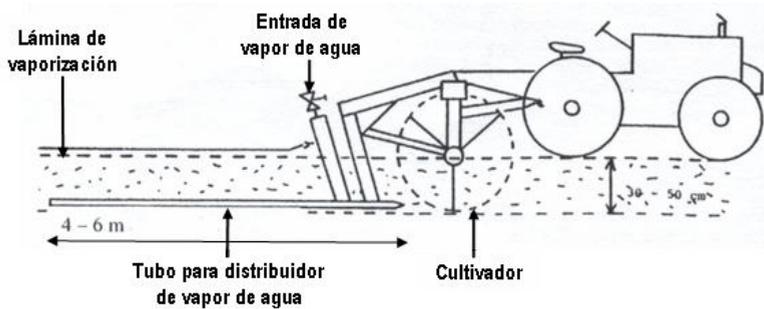


Figura 25. Inyector de vapor de agua (Runia, 2000).

Es efectivo para desinfectar suelos arcillosos, pero su efectividad es mejor en suelos francos y arenosos. Su efectividad depende de la velocidad de avance del sistema tractor-inyector.

White (2000), presenta un sistema automatizado bajo túnel (Figura 26), el cual aplica el vapor de agua sólo por algunos minutos. Aplica el vapor de agua en un túnel con un ancho de 7,5 m, el área tratada al mismo tiempo es de 12 m² y tiene un rendimiento de 120 m² por hora. Los costos de operación son relativamente bajos.



Figura 26. Túnel para la aplicación de vapor de agua (White, 2000).

En la actualidad es el sistema más eficiente para desinfectar el suelo o sustrato con vapor de agua. El periodo de aplicación de vapor de agua es más corto, sólo minutos, comparado con los métodos tradicionales de parrilla y rastrillo. Los costos de operación son relativamente bajos. Aunque la inversión inicial es relativamente alta.

Es una alternativa viable para la desinfección del suelo o del sustrato para pequeñas áreas a campo abierto y cultivo protegido, y con menos riesgo de contaminación ambiental.

Aplicación de vapor de agua a “campana”

La diferencia de este método respecto a los anteriores es que el vapor en lugar de ser introducido en el suelo a cierta profundidad es emitido desde la superficie en el interior de una campana ya sea fija o desplazable. La campana puede ser de acero o de cualquier otro material (Figura 27), la cual puede variar de la forma según la sección de los caballones o de las camas a tratar. Según Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, (1999) no deben superar un área de 6 m². La anchura de las campanas en cualquier caso no debe medir menos de 200 mm. Una vez colocada la campana, debe apretarse de modo que se introduzcan los bordes convenientemente en el terreno para que no haya fugas y aumente la presión de vapor en las superficie. La ventaja de este método es que es sencillo y fácil de usar, no requiere lona. El inconveniente es que sólo es adecuado para tratar terrenos o sustratos poco profundos, también puede utilizarse para pequeñas camas de suelo o sustrato a nivel del terreno.

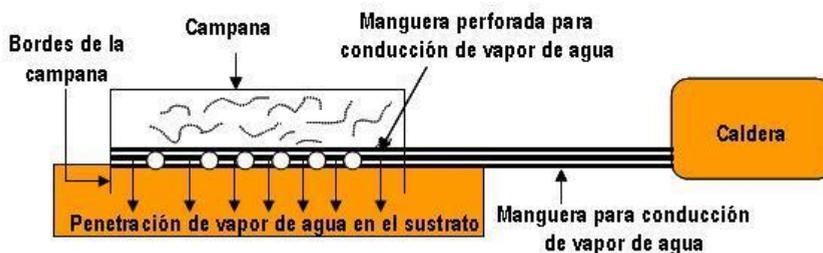
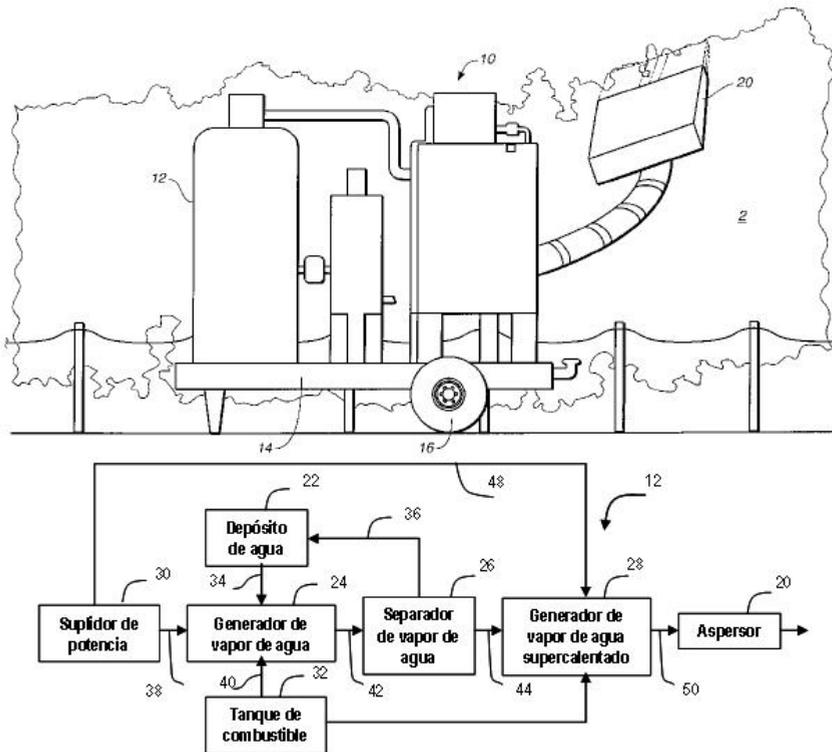


Figura 27. Equipo “a campana” (Messiaen *et al.*, 1995; Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni, 1999)

Es un sistema efectivo para desinfección de suelos arcillosos, arenosos y con altos contenidos de materia orgánica, comparado con el sistema de lámina de vaporización. El periodo de aplicación de vapor de agua suele ser de 4 horas. Las temperaturas alcanzadas en las capas superiores del suelo son más altas en comparación con el sistema de tubos de drenaje y similares o un poco

más bajas en las capas inferiores. Los costos de inversión son muy similares a la *Parrilla Hoddesdon*

Brown en 1999 realizó una patente de un equipo móvil para emitir vapor de agua sobrecalentado para uso agrícola, mostrado en la Figura 28. Este equipo permite la aplicación de vapor tanto desde la parte superior del suelo, destinado a la eliminación de patógenos, como para la eliminación de malas hiervas, o ser dirigidos a partes específicas de la planta, tales como hojas para realizar un aclareo, por ejemplo en la vid.



2. Vides.

10. Aparato para liberación de vapor de agua sobrecalentado.

12. Porción de liberación de vapor de agua sobrecalentado.

14. Estructura portátil de tiro. Se puede acoplar a un tractor.

16. Ruedas de transporte.

20. Boquillas aspersoras.

22. Tanque de agua.

24. Generador de vapor de agua.

26. Separador de vapor de agua.

28. Generador de vapor de agua sobrecalentado.

- 30. Suplidor de potencia eléctrica.
- 32. Tanque de combustible.
- 34. Línea para el agua.
- 36. Línea de retorno de agua al tanque para el agua.
- 38. Línea para transmitir la potencia del suplementador de potencia al generador de vapor con el propósito de activar un soplador de aire.
- 40. Línea para el combustible del tanque de combustible al generador de vapor de agua.
- 42. Línea de alimentación de vapor del generador de vapor de agua al separador de vapor de agua.
- 44. Línea de alimentación de vapor de agua del separador de vapor de agua al generador de vapor de agua sobrecalentado.
- 46. Línea de alimentación de combustible del tanque de combustible al generador de vapor de agua sobrecalentado.
- 48. Línea de transmisión de potencia del suplidor de potencia al generador de vapor de agua sobrecalentado.
- 50. Línea de alimentación de vapor de agua sobrecalentado del generador de vapor de agua sobrecalentado hacia la boquilla.

Figura 28. Equipo para liberación de vapor de agua sobrecalentado (Brown, 1999).

Según el esquema el aparato comprende una estructura portable, con un tanque para el agua y un calentador montado en la estructura. Posee dos generadores, el primero (24) para producir vapor de agua mientras el segundo (28) produce el sobre calentamiento del vapor. La invención también incluye un separador de agua líquida (26) mejorando la eficiencia del consumo.

Un aspecto de la invención es que incluye la posibilidad de ser aplicado en la defoliación de las vides, por medio de la liberación de vapor sobrecalentado hacia el área basal de las hojas y envolviendo los racimos dentro de las envolturas deseadas. La envoltura deseada tiene un tamaño característico dentro del cual el vapor de agua tiene un rango de temperatura suficiente para defoliar, y que sorprendentemente no daña los racimos de uva o de polidrupa.

Peruzzi *et al.*, (1999) desarrolla el llamado sistema *Alce Garden*. Este sistema consiste en la desinfección del suelo mediante aplicación de vapor y la distribución de diversas sustancias para conseguir reacciones exotérmicas, que mejoren la efectividad térmica de la aplicación directa de vapor en el suelo, a una profundidad establecida, con la posibilidad de extender un film plástico, para mantener los niveles de temperatura durante largo tiempo.

Peruzzi junto con la empresa Celli probó tres prototipos de máquinas de desinfección basados en este sistema en campos de lechuga afectados con *Sclerotinia spp.* Las sustancias probadas para conseguir una reacción exotérmica fueron KOH y CaO.

Los datos técnicos de cada uno de los prototipos fueron los siguientes:

Tabla 4. Características de las máquinas ensayadas por Peruzzi con el sistema Alce Garden

		MAQUINA REMOLCA	MAQUINA SUSPENDID	MAQUINA AUTOPROPULSAD
		DA	A	A
CALDE RA	Temperatura (°C)	110 – 120	110 – 120	110 – 120
	Caudal (kg/h)	1000	2000 1300	650
	Potencia (MJ/h)	2512	5000 3000	1630
	Pres. serv. (MPa)	0,9	2 – 0,6	0,9
DEPOSITO AGUA (m ³)		1	1,24	2 dep.* 0.6 = 1.2
ANCHO TRABAJO	Inyect. vapor (m)	1,6	1,8	1,56
MOTOR	Potencia	118 kW	118 kW	45 kW
Aplicación		Campo Abierto		Invernadero

La velocidad de trabajo de estas máquinas resultó muy lenta (150 m/h), y la desinfección no fue del todo eficaz.

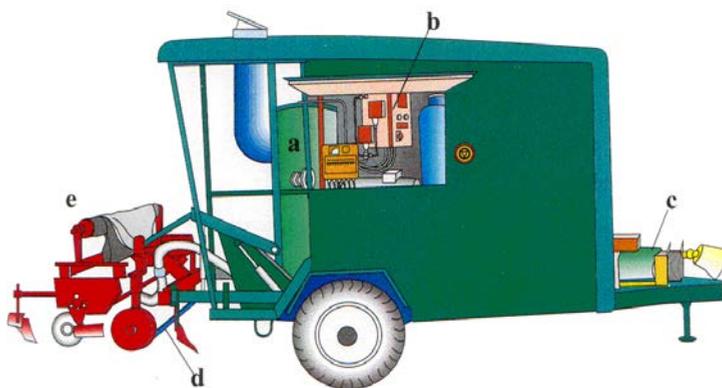


Figura 29. Esquema del primer prototipo remolcado de la máquina para la desinfección del terreno de la empresa Celli, utilizado en las pruebas durante el año 1999: (a) generador del vapor; (b) panel de control; (c) generador de electricidad; (d) barra distribuidora del vapor de agua; (e) arado-extendedora del film

Fuente: Peruzzi *et al.*, 1999.



Figura 30. Vista lateral de la máquina para la desinfección del terreno versión remolcada (Peruzzi *et al.*, 1999).

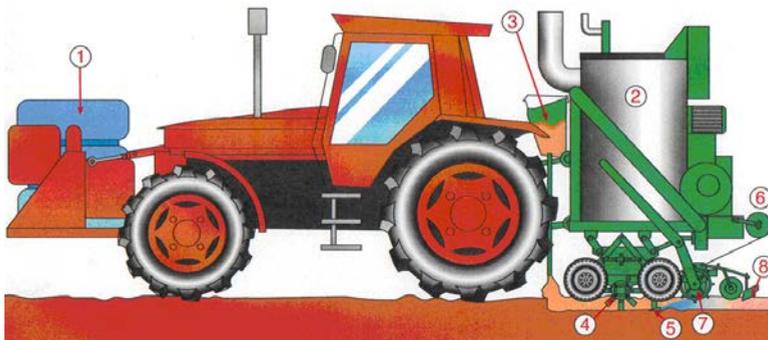


Figura 31. Esquema de la versión suspendida para la desinfección del terreno adaptada para efectuar el tratamiento en pleno campo: (1) depósito de agua; (2) generador de vapor; (3) depósito que contiene la sustancia a reacción exotérmica; (4) rotor de hojas; (5) barra de distribución del vapor; (6) bobina de film plástico; (7) barra compactadora; (8) arado-extensión del film (Peruzzi *et al.*, 1999).

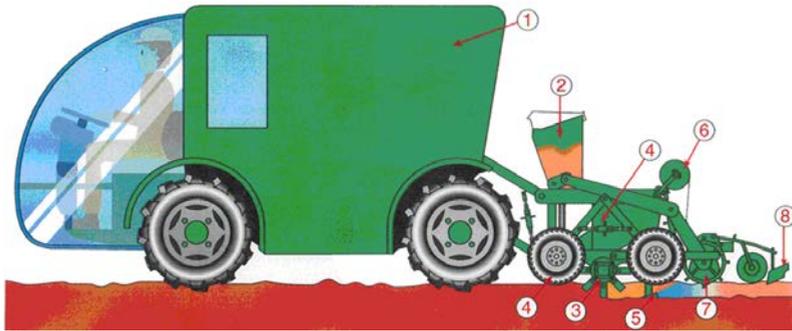


Figura 32. Esquema de la máquina autopropulsada para la desinfección del terreno adaptada para efectuar el tratamiento en invernadero: (1) cuerpo de la máquina que contiene el generador de vapor, el panel de control y el generador de electricidad; (2) depósito que contiene la sustancia; (3) rotor de hojas; (4) sistema para la regulación de la profundidad de trabajo del rotor; (5) barra de distribución del vapor ; (6) bobina de film plástico; (7) barra compactadora; (8) arado-extensión del film (Peruzzi *et al.*, 1999)

En la actualidad diversas empresas comercializan equipos remolcados para la aplicación de vapor. Consultando los catálogos se han extraído las siguientes características:

Tabla 5. Características técnicas de calderas destinadas a la desinfección de suelo

Rendimiento de vapor (kg/h)	Rendimiento de calor kW	Consumo de vapor (kg/l)	Medidas		Peso (kg)
			Long x Anch. x Alt		
400	290	26	3,10 x 1,20 x 2,00		1460
550	410	36	3,70 x 1,40 x 2,20		1780
800	580	55	4,10 x 1,50 x 2,50		2300
1000	740	68	4,50 x 1,70 x 2,60		2750
1350	1030	100	5,00 x 1,80 x 2,70		3580
2000	1500	150	5,70 x 2,20 x 3,00		4200

Esterilización con vapor de agua por depresión

En este tratamiento por vapor se utiliza un ventilador para producir una depresión en el interior de tuberías enterradas de forma que el vapor suministrado en la superficie del suelo sea atraído activamente hacia abajo (Figura 33). Este dispositivo proporciona una distribución más uniforme y más en profundidad del calor que utilizando la campana (Heijna, 1966 y Runia, 1983, citados por Jarvis 1998). El vapor de agua se distribuye bajo una lámina por la presión negativa, creada por un ventilador, el cual expulsa

el aire hacia fuera de la masa de suelo a través de los tubos de polipropeno perforados y enterrados. Es importante encender el ventilador antes de que se aplique el vapor de agua, y apagarlo al menos 2 horas después de quitar el suministro de vapor de agua.

Este tratamiento necesita menos combustible para generar vapor que con el sistema de plancha hinchable. Por ejemplo, Ruina (1983), citado por Jarvis (1998) suministró 200 MJ m^{-2} para el sistema de tratamiento por vapor superficial con plancha de plástico, 170 MJ m^{-2} para el tratamiento de vapor por medio de tuberías enterradas, y solamente 150 MJ m^{-2} para el tratamiento por depresión. El tiempo necesario para el tratamiento por vapor puede reducirse en 4 o 5 horas y las pérdidas por radiación son menores que en el caso plancha hinchable y de la superficie del suelo después que haya sido quitada la plancha de plástico.

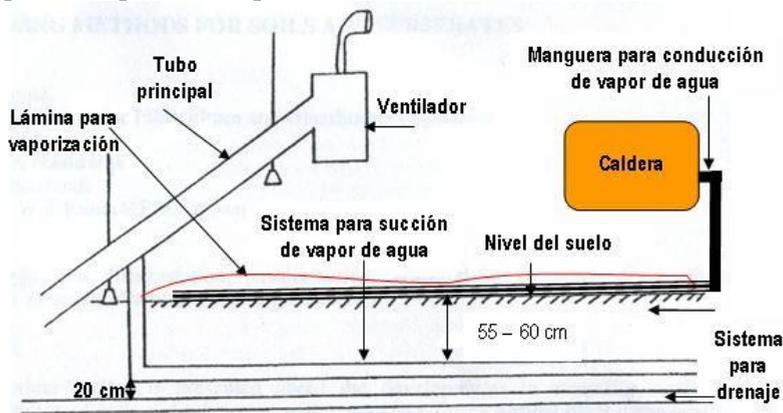


Figura 33. Sistema para la aplicación de vapor de agua por presión negativa (Runia, 2000.)

Equipo para aplicar calor húmedo con vapor de agua generado por una resistencia eléctrica

En los equipos para pasteurizar suelo o sustratos agrícolas (Figura 34) las resistencias eléctricas se disponen en paralelo a intervalos de 150 a 200 mm, el consumo de energía es alto no menor de 25 amperes (French y Hebert, 1997).

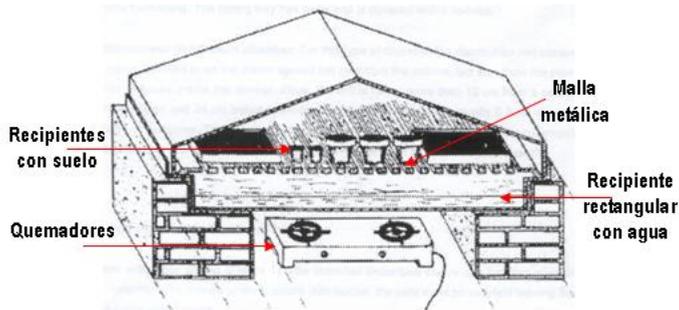


Figura 34. Cubo cubierto (French y Hebert, 1997).

Equipos para aplicar vapor de agua aireado

Una técnica de aplicación de vapor de agua como medio para intentar controlar los parásitos presentes en el terreno consiste en emplear mezclas de vapor-aire, para aumentar la movilidad del calor en el suelo y conseguir un ahorro sustancial de energía. Con vapor de agua aireado la pasteurización del suelo o sustrato se realiza a temperaturas de 60 a 70°C (Langhans, 1990), 60 a 82°C (Bartok, 1994), 60°C (Boodley, 1996), 70°C (EPA, 2002), 63 a 71°C (Williams-Woodward, 2003) por un tiempo de 30 minutos.

Cuando se mezcla el aire con el vapor de agua, la temperatura del vapor de agua se reduce de 100°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, humedad relativa, y temperatura del vapor. En la Tabla 6 se dan algunas relaciones vapor de agua/aire para diferentes temperaturas.

Tabla 6. Relaciones vapor de agua/aire y aire/vapor de agua, y kJ m^{-3} de la mezcla vapor de agua-aireado para varias temperaturas, con aire a 21 °C a 50 % de humedad relativa y vapor de agua saturado a 110 °C (Langhans, 1990).

Temperatura del vapor de agua-aireado (°C)	Relación vapor de agua : aire ($\text{kg}_{\text{va}} \text{m}^{-3} \text{aire}$)	Relación aire : vapor de agua ($\text{m}^3_{\text{aire}} \text{kg}^{-1}_{\text{va}}$)	kJ m^{-3}
60	0,18	5,55	1907,33
65	0,25	3,96	2676,18
70	0,36	2,77	3799,88
75	0,50	1,95	5515,00
80	0,78	1,27	8398,18
85	1,36	0,73	14031,48

Donde: kg_{va} – kilogramos de vapor de agua; m^3_{aire} – metros cúbicos de aire.

Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni (1999) indican que la cantidad de aire que hay que pasar a través de una válvula especial está en relación con la temperatura fijada para el tratamiento (para obtener una mezcla vapor-aire a 70°C, hay que añadir 3,5 kg de aire por kilogramo de vapor a 100°C).

a) *Contenedores estacionarios*

El equipo básico para aplicar vapor de agua-aireado incluye un ventilador y una válvula para el control de vapor de agua. El vapor de agua se aplica a una corriente de aire formando una mezcla vapor de agua y aire. El control de la temperatura del vapor de agua aireado se determina con un termómetro instalado justo donde se tiene lugar la mezcla. El control también se puede obtener variando la velocidad del ventilador, pero es una práctica poco usual. El ventilador obliga a la mezcla vapor de agua-aire a pasar a través del suelo, por lo tanto, se produce un flujo a una cierta presión. Una presión estática suele ser de 1,5 MPa para todo tipo de suelos. El vapor puede ser aplicado tanto desde la superficie superior del suelo, discurriendo en sentido descendente (Langhans, 1990) (Figura 35), como desde una tubería enterrada discurriendo en sentido ascendente (Jarvis, 1998) (Figura 36).

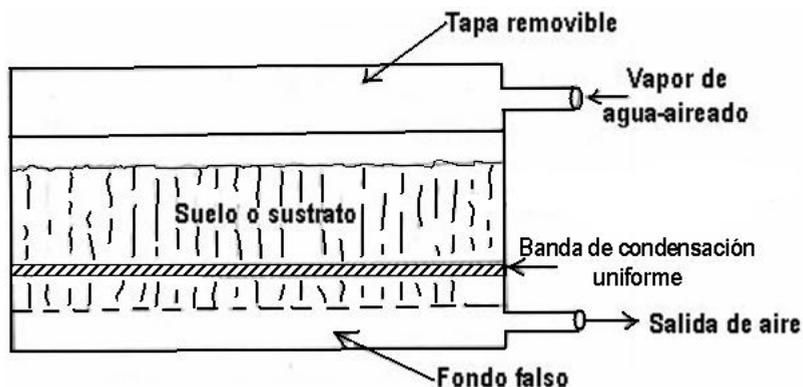


Figura 35. Banco para aplicar vapor de agua-aireado de arriba hacia abajo al suelo o sustrato

Fuente: Langhans,1990.

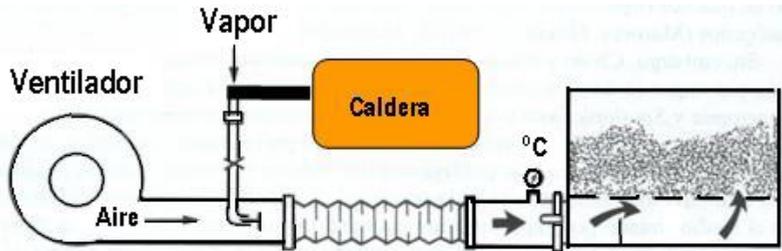


Figura 36. Sistema estático para la aplicación de vapor de agua-aireado de abajo hacia arriba

Fuente: Jarvis, 1998.

Bartok (1994), menciona que en este método el vapor de agua combinado con el aire enviado por un ventilador a alta presión debe formar una mezcla de 60 a 85°C, la cual es forzada a pasar a través del sustrato con una presión estática de 5 a 6 MPa. Con un diseño apropiado, el sistema se puede adaptar para tratar el sustrato a flujo continuo. Para un tratamiento común, la mezcla vapor de agua-aire es enviada a la parte inferior de una cámara de doble fondo, en la cual el piso superior está perforado. Se usa una cobertura para retener el vapor de agua, pero se permite el escape del aire.

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 este se requiera (Langhans, 1990). La ventaja es que es un equipo sencillo y fácil de instalar. La cantidad de vapor de agua aplicada es menor comparado con la aplicación de vapor de agua solamente. Los costos de operación son más bajos comparado con la aplicación de vapor de agua solamente. Como desventajas presenta que sólo se pueden tratar pequeñas cantidades de suelo o sustrato. Requiere mayor mano de obra comparado con un equipo móvil.

b) Sistema móvil, remolque tipo carretilla, para la aplicación de vapor de agua-aireado

Constituyen equipos de pasteurización o esterilización con vapor aireado montados sobre carretas, remolques y cuerpos de camiones. Esto permite transportar el sustrato después de la pasteurización a donde se requiera (Langhans, 1990). La ventaja de este equipo es que requiere de menos mano de obra comparado con un equipo estacionario. La desventaja es que inicialmente la inversión es mayor que en un equipo estacionario.

La mezcla de vapor de agua aireado atraviesa el volumen del suelo o sustrato transfiriéndole el calor a éste (Figuras 37 y 38). Un termómetro permite monitorear la temperatura durante el proceso de desinfección. Cuando se

alcanza la temperatura deseada, se puede reducir el flujo de vapor de agua aireado manteniéndose a un nivel más bajo adecuado durante 30 minutos para mantener la temperatura. Después del tratamiento el suelo o sustrato se puede enfriar rápidamente por permitir que el ventilador siga enviando un flujo de aire por un periodo de tiempo corto.



Figura 37. Sistema móvil tipo carretilla (A.C.A., 2003).



Figura 38. Sistema móvil tipo remolque (A.C.A., 2003).

La ventaja principal es que después de la desinfección el suelo o sustrato se puede transportar al lugar donde se requiere. La cantidad de vapor de agua aplicado es más baja comparado con la aplicación de vapor de agua solamente. Los costos de operación son más bajos comparado con la aplicación de vapor de agua solamente. Como desventaja presenta que sólo se pueden tratar pequeñas cantidades de suelo o sustrato. La inversión inicial es relativamente grande.

En los sistemas Siebring (Figura 39), en el ciclo de pasteurización con vapor de agua, el generador SG10 aumenta la temperatura entre 65°C y 75°C en 15 minutos a un suelo o sustrato con volumen de 1,5 m³. El ventilador AB28 genera un flujo de aire de 7 kPa de presión estática con un gasto de 550 m³ h⁻¹, el cual se mezcla con el flujo de vapor de agua. La mezcla se conduce hacia el remolque y atraviesa el sustrato de abajo hacia arriba. Durante el ciclo de enfriamiento el ventilador puede secar el material al nivel de humedad existente antes de la pasteurización.



Figura 39. Equipo utilizado para aplicar vapor de agua-aireado dentro de un remolque (Siebring.html, 2003):

c) 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 de 1 a la 7. Después de alcanzar la temperatura deseada, el tiempo requerido para la desinfección se puede fijar.

El flujo de calor aportado por el equipo se calcula mediante la ecuación 8 (Langhans, 1990).

$$q_{ae} = \frac{Q_{tr}}{T_{rd}} \quad (8)$$

Donde: q_{ae} - flujo de calor aportado por el equipo, W; Q_{tr} - cantidad total de calor requerido, kJ; T_{rd} - tiempo requerido para la desinfección, s.

El flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo se calcula con la ecuación 9 (Langhans, 1990).

$$q_{vaa} = \frac{q_{ae}}{EE_{vaa}} \quad (9)$$

Donde: q_{vaa} - flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo, $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$; q_{ae} - flujo de calor aportado por el equipo, kJ min^{-1} ; EE_{vaa} - equivalente energético del vapor de agua-aireado, kJ m^{-3} . Se obtiene del cuadro 4.

La mayoría de los sistemas asumen un 50% de eficiencia, por lo tanto el valor de q_{vaa} se multiplica por 2. El flujo de vapor de agua se calcula con la ecuación 10 (Langhans, 1994).

$$q_{va} = 2 \cdot RVAA_{TFD} \cdot q_{vaa} \quad (10)$$

Donde: q_{va} - flujo de vapor de agua aportado por el equipo, $\text{kg}_{va} \text{min}^{-1}$; q_{vaa} - flujo de vapor de agua-aireado aportado por el equipo, $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$; $RVAA_{TFD}$ - relación de vapor de agua/aire para la temperatura fijada para la desinfección, $\text{kg}_{va} \text{m}^{-3}_{\text{aire}}$, se obtiene del cuadro 9.

La cantidad total de vapor de agua durante el tiempo fijado para la desinfección se obtiene con la ecuación 11.

$$q_{tva} = q_{va} \cdot TFD \quad (11)$$

Donde: q_{tva} - cantidad total de vapor de agua aportado durante tiempo fijado para la desinfección, kg de vapor de agua; TFD - tiempo fijado para la desinfección, min.

Observaciones generales para los equipos para aplicar calor mediante vapor de agua

a) Observaciones en el estado físico del suelo

1. En general para todos los tipos de suelo se requiere una preparación profunda del mismo para que los resultados de la aplicación de calor sean óptimos. En un suelo bien preparado se tiene una buena distribución vertical y horizontal del vapor de agua (Runia, 2000).
2. La condensación del vapor de agua durante el proceso incrementa el nivel de humedad en 5 a 6%, incluso en los primeros 100 mm el contenido de humedad del suelo se puede incrementar por 10 a 11%. Cuanto más seco sea el suelo inicialmente, la mayor parte del agua condensada se absorbe, alcanzando un resultado óptimo de la aplicación de vapor de agua. Sin embargo un alto contenido de agua puede dañar la estructura del suelo (Runia, 2000).

b) Observaciones en el estado químico del suelo

1. Una liberación de cantidades excesivamente grandes de manganeso después de la aplicación de vapor de agua algunas veces retarda el crecimiento de las plantas debido a la toxicidad del manganeso. El manganeso se libera en cantidades excesivas y tóxicas para las plantas a temperaturas mayores de 85 °C (Hudson *et al.*, 1990; Runia, 2000).
2. Un incremento en los niveles de nitrato y amonio después de la aplicación de vapor de agua también puede afectar el crecimiento de las plantas, aunque en general el estado del manganeso tiene un efecto más profundo sobre el crecimiento de las plantas que el estado del nitrógeno (Hudson *et al.*, 1990; Runia, 2000). En caso de que la temperatura de pasteurización este por arriba de 85°C, después del tratamiento se recomienda dejar de 2 a 3 semanas (Runia, 2000) o 4 a 6 semanas (Hudson *et al.*, 1990) para que el amonio se transforme a nitrato.

c) Observaciones sobre consumo de combustible

1. El método de lámina de vaporización requiere de periodos grandes de exposición, mas de 8 horas, durante el cual se consumo aproximadamente 7 m³ de gas natural por m² de suelo o sustrato (Runia, 2000).

Ventajas de la desinfección con calor aplicado mediante vapor de agua

Desde el punto de vista operativo no existen diferencias sustanciales entre la utilización del vapor saturado o sobrecalentado y la mezcla vapor-aire (Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni 1999).

1. El suelo o sustrato pasteurizado con vapor de agua se puede utilizar tan pronto como se enfrían (Langhans, 1990; Bartok, 1994; Burés, 1997; Boodley, 1996; MEA, 1999; EPA, 2002). En este sentido Haasteren (1996), citado por nether.htm (2003), menciona que el suelo o sustrato tratado se puede utilizar en menos de cinco días.
2. El vapor de agua no es selectivo, es decir erradica todos los patógenos y semillas de malas hierbas (Langhans, 1990; Bartok, 1994).
3. Control de la temperatura del suelo o sustrato y por lo tanto de la efectividad (Burés, 1997).
4. No resulta tóxico para los humanos (Bartok, 1994; Burés, 1997; EPA, 2002). Aunado a lo anterior Bartok (1994) y Boodley (1996), mencionan que el vapor de agua no causa daño a las plantas de los bancales adyacentes. Por lo anterior el vapor de agua se considera un sustituto importante del bromuro de metilo para la esterilización del sustrato (Haasteren, 1996, citado por nether.htm, 2003).
5. Se difunde más eficientemente que el calor seco a través del suelo o sustrato lo cual repercute en un costo más eficiente (Aloisi *et al.*, 2001; EPA, 2002).
6. Es una tecnología limpia y fácil de usar (EPA, 2002).
7. No se requieren licencias especiales de aplicación (Burés, 1997).
8. Es una tecnología más rápida y más efectiva que el calor seco (anónimo, sin año).

Desventajas de la desinfección con calor aplicado mediante vapor de agua

1. No es factible y operacional en grandes campos de cultivo debido a su velocidad lenta de aplicación y por lo tanto alto costo de energía e inversión. (EPA, 2002).
2. En campo abierto, debido a una limitada penetración del vapor de agua, la aplicación superficial puede no alcanzar los patógenos de raíces profundas de árboles y cultivos (EPA, 2002).
3. Es un método ineficiente en suelos húmedos, y temperaturas entre 85 a 100 °C destruyen la estructura del suelo o sustrato (EPA, 2002).
4. Temperaturas por arriba de 84 °C (Boodley, 1996), 85°C (EPA, 2000), erradican patógenos y organismos benéficos y, liberan sales fitotóxicas. En este mismo sentido Bartok (1994), Burés (1997), mencionan que si la

temperatura se mantiene alta, erradica la microflora e incrementa la cantidad de sales solubles. Por otro lado Jarvis, (1998), y Triolo y Lorenzini, citados por Alpi y Tognoni (1999), mencionan que debido a la mayor duración de este tratamiento se incrementan los efectos fitotóxicos, así como un vacío biológico que podría ser ocupado igualmente bien por los patógenos que por los saprofitos.

Ventajas del sistema de vapor de agua-aireado

1. El calentamiento es más rápido debido a que se fuerza el vapor de agua a través del sustrato (Bartok, 1994; Boodley, 1996; EPA, 2002).
2. El enfriamiento después del proceso de pasteurización es más rápido (Bartok, 1994; Boodley, 1996; EPA, 2002)..
3. Se requiere arriba de 40% de vapor de agua menos, por lo cual el suelo o sustrato no se calienta mucho, se evita un sobrecalentamiento (Langhans, 1990; Bartok, 1994; Boodley, 1996).
4. Es 40 % más barato que el vapor de agua y entre 30 y 50 % más barato que el bromuro de metilo (EPA, 2002).
5. La microflora sobrevive a baja temperatura de esterilización (Langhans, 1990; Bartok, 1994; Boodley, 1996; EPA, 2002).
6. Es menos fitotóxico que el vapor de agua (Boodley, 1998).

Desventajas del sistema de vapor de agua-aireado

1. No es confiable con algunos virus y semillas de malas hierbas resistentes a altas temperaturas (Williams-Woodward, 2003).

II.5 Control por Solarización

Es un método físico en el cual se calienta el terreno por medio de energía solar. Este calentamiento se logra cubriendo el terreno con un film plástico transparente durante al menos 30 días. En principio la cubrición con plástico hace que el incremento de temperatura por la radiación de los rayos solares en el suelo sea mayor y se mantenga más uniforme durante el transcurso del día.

Solarización del terreno fue introducida a mitad de los años 70 en investigaciones realizadas por Katan *et al.*, (1976). Pero fue en 1980 cuando se generalizó su uso en Israel, donde se empezó a emplear una lámina de polietileno transparente para conseguir el calentamiento del suelo (Katan, 1980).

Braun y Supkoff (1994), midieron en los primeros 5 cm del suelo temperaturas entre 50 a 55 °C y 40 a 42 °C entre los 20 y 25 cm.

En general, el suelo tiene una baja conductividad térmica y su capacidad calorífica se encuentra entre 0,27 y 0,8 cal/g°C, situación por la cual la penetración del calor es lenta. Cebolla *et al.*, (1998), propone la ecuación de MAHREER para describir el balance de energía de un suelo no acolchado.

$$(1 - a) \cdot R_s + e_s \cdot R_l - H - E - S - e_s \cdot O \cdot T_s = 0$$

a = Albedo, depende del color del suelo

R_s = Radiación solar incidente

R_l = Radiación incidente de onda larga

H = flujo de calor sensible desde o hacia la atmósfera

E = Flujo de calor latente (evaporación)

S = Flujo de calor en el suelo

O = Constante de Stephan – Boltzman.

T_s = Temperatura Superficial del suelo.

e_s = Coeficiente de emisividad del suelo.

Esta ecuación no es aplicable para suelos acolchados, ya que la cubierta modifica el albedo y el flujo de calor sensible desde o hacia la atmósfera entre otros factores, pero da una idea de los parámetros involucrados en el proceso.

Cenis (1989), ha obtenido una ecuación que permite predecir las temperaturas alcanzables para controlar las malas hierbas o patógenos y estimar los tiempos de exposición necesarios, basándose en las temperaturas máximas y mínimas del suelo a profundidades de 10 y 20 cm durante 7 días en una parcela de 2 metros cuadrados. El material que se recomienda es el polietileno en espesores de 25 a 50 micras.

Investigaciones realizadas por Cebolla *et al.*, (1998). ha demostrado la eficiencia en el uso de dos laminas de plástico. Cebolla *et al.*, (1998). tras un periodo de solarización de 4 semanas con doble cubierta consigue tiempos de exposición de 84 horas a 50 °C a 10 cm de profundidad, igualmente alcanza durante dos días de exposición temperaturas de a 50 °C a 10 cm durante 4 a 6 horas.

Los valores de temperatura que se logran en el suelo dependen del tiempo de exposición al sol y de la profundidad del suelo.

Como prácticas agrícolas necesarias para la implementación de la solarización Cebolla *et al.* (1998) recomiendan:

- Labranza que permita un suelo mullido y bien desmenuzado
- Realizar un solo riego abundante que permita llevar el suelo a humedades superiores a capacidad de campo en los primeros 30 cm
- Colocar el plástico en forma continua, tensa y con cierre en los extremos
- La duración mínima del acolchado debe ser de un mes o más, cuanto más tiempo mejor.
- Utilizar la solarización en épocas de verano para la zona mediterránea. Se recomienda los meses de mayo a septiembre.

Los resultados obtenidos demuestran que estos sistemas pueden ser aplicados para el control de patógenos y de algunas malas hierbas pero es un método que depende de las condiciones climáticas, por lo tanto su eficacia es muy limitada.

La efectividad del método disminuye conforme aumenta la latitud ya que sólo puede ser utilizada en condiciones ambientales y climáticas particulares, esto es en climas típicos de áreas tropicales y subtropicales, que garanticen elevadas temperaturas y una suficiente radiación solar. Las principales ventajas son el reducido coste, el bajo impacto ambiental y la facilidad de integrarse fácilmente con otros métodos de lucha; pero su estrecho espectro de acción y su largo periodo improductivo necesario para poder realizar el tratamiento (6-8 semanas) hacen su difusión problemática entre los agricultores (Braun y Supkoff, 1994).

II.6 Control por Aplicación de Llama

Tradicionalmente se ha empleado la quema de rastrojos de la cosecha anterior con la finalidad de eliminar los residuos y el saneamiento del suelo. Este método de crear llama en la superficie del suelo, para que a través de las altas temperaturas se eliminen los organismos perjudiciales y malas hierbas, ha llevado a desarrollar diferentes estudios sobre equipos basados en este principio.

Peruzzi *et al.*, (1994), determinó los consumos energéticos de diversos equipos quemadores en el control de malas hierbas en el cultivo de maíz

durante dos años frente a otros sistemas de manejo: el convencional, el biológico y el “band” (alta reducción de “input” y explotaciones de área muy reducida). Encontró que el sistema de quemadores tenía un consumo de 2980 MJ/ha en comparación con los sistemas que empleaban herbicidas (convencional) 1450 MJ/ha.

El sistema de aplicación de llama ha sido usado en EE.UU. para el control de las malas hierbas en algodón y maíz. Existen actualmente investigaciones en la Universidad de la Florida y en la Universidad de Texas (Laguè *et al.*, 1992).

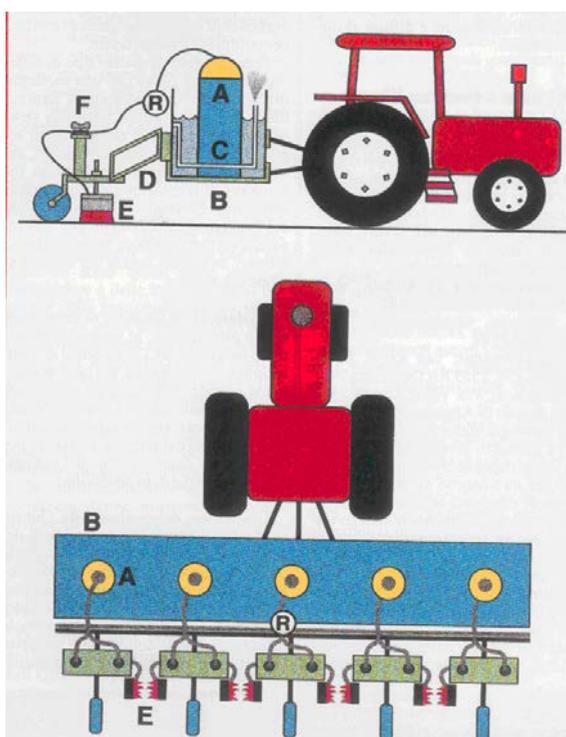


Figura 40. Esquema de los componentes de un quemador de malas hierbas en sistema de post-emergencia (Laguè *et al.*, 1992)

Estas investigaciones afirman que la aplicación de llama con quemadores es eficaz cuando las malas hierbas son pequeñas (alturas entre 4 - 5 cm) y el tiempo de exposición es tal que permite el calentamiento de la planta hasta romper sus paredes celulares. El tiempo de aplicación no debe excederse pudiendo provocar la combustión de la planta.

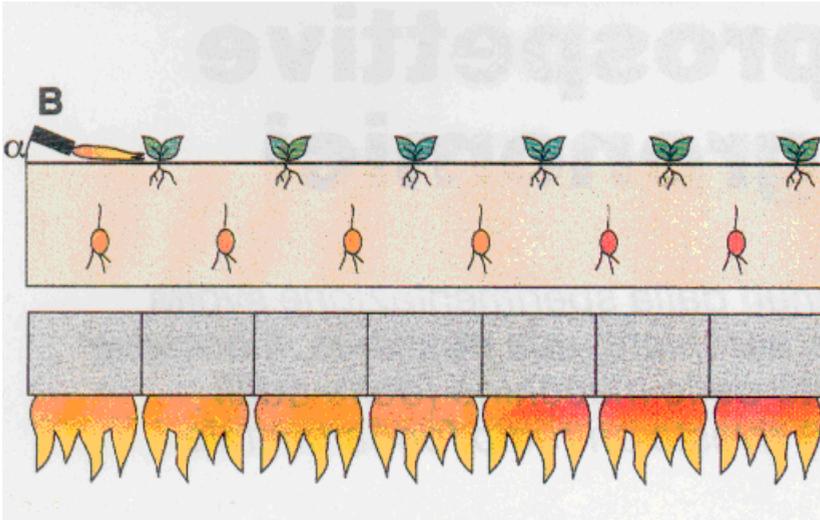


Figura 41. Esquema sobre la forma de acción de la llama en un sistema de control de malas hierbas en preemergencia (Laguë *et al.*, 1992).

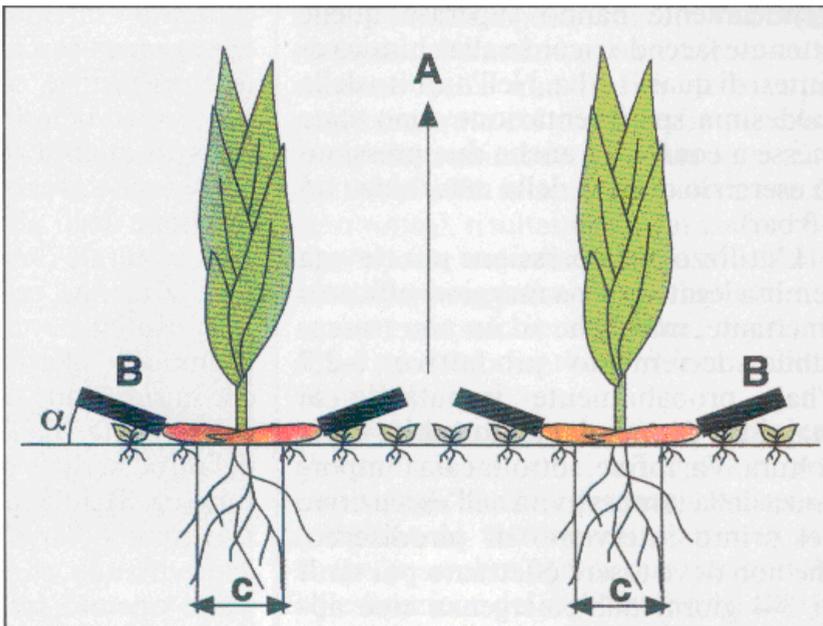


Figura 42. Esquema de la acción del quemador, en un sistema pos-emergente, selectivo (Laguë *et al.*, 1992).

El combustible utilizado es generalmente butano o propano, almacenado en bombonas a una presión de 6 a 16 bares. El gas llega a los quemadores a presiones comprendidas entre 2,5 a 4 bares, siendo el consumo de un quemador de llama del orden de 8 a 15 l/h, empleando en promedio de 40 a 60 l/ha.

Peruzzi *et al.* (1996) evaluó el consumo de combustible (Butano), en el control de la mala hierba (*Sinapis alba* L. Mostaza) a diferentes velocidades y presiones de aplicación, encontrando que la efectividad del control disminuye con el aumento de la velocidad de aplicación y aumenta con el aumento de la presión. Comprobó una inhibición del 100% con velocidades de 1 km/hora a presiones de 4 bares, eficiencias del 92% con velocidades de 7 km/h a presiones de 4 bares.

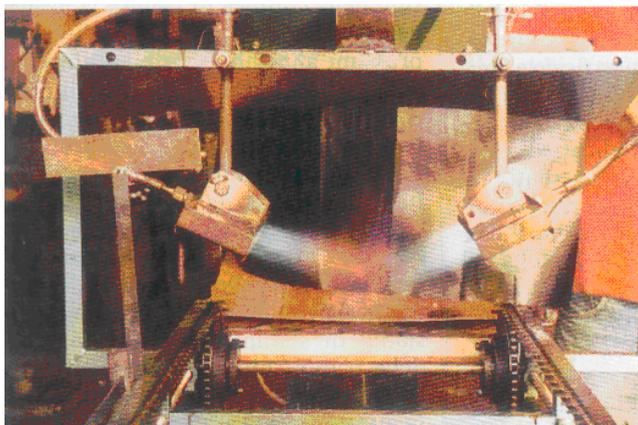


Figura 43. Fotografía de las boquillas aplicadoras de llama en el banco del laboratorio de la universidad de Pisa (Peruzzi *et al.*, 1996).

El mínimo consumo de combustible para un control de las malas hierbas del 90% es estimado para los primeros días de desarrollo en 20 kg/ha y se obtiene para velocidades de 9 km/h y presiones de 4 bares, para periodos vegetativos posteriores el consumo es de 40 kg/ha (5 km/h a 4 bares).

II.7 Control mediante radiación electromagnética infrarroja

En las últimas décadas el uso de radiación infrarroja ha sido estudiada por diversos investigadores. Vester (1986), citado por Rovira *et al.*, (2001),

explica el funcionamiento de diversos equipos emisores de radiación infrarroja y su efecto sobre los tejidos vegetales;

Los equipos emisores más comunes de radiación infrarroja están compuestos por quemadores de gas que calientan una rejilla de acero a una temperatura aproximada de 950 °C. Los reflectores de acero dirigen la energía hacia el área de aplicación, concentrándola. Las radiaciones de calor resultantes calientan la vegetación a tratar a una temperatura aproximada de 70°C, produciendo la coagulación de las proteínas y la rotura de las paredes celulares por dilatación. Con ello se impide el crecimiento ulterior de las partes quemadas de la planta.

Pasado un periodo comprendido entre unas horas y varios días, según las condiciones atmosféricas, el color verde de las plantas se torna marrón-pardo. La fotosíntesis se ve interrumpida y debilita el crecimiento de la planta. A medida que se van repitiendo los procesos de calentamiento, a intervalos de tiempo en función del medio ambiente que rodea las hierbas a tratar, se consigue la eliminación de las mismas.

Generalmente los aparatos de infrarrojos se componen de uno o varios módulos de radiación. La llama producida por los quemadores no accede al exterior, sino que calienta las rejillas de acero al rojo, transmitiendo éstas solas, al estar cerradas, las radiaciones de calor. De esta forma, sin llama abierta, se obtiene un alto grado de seguridad en la utilización respecto a quemadores directos.

Según Ascard (1997), no existen grandes diferencias en eficiencia energética entre quemadores de llama y emisores de infrarrojos, aunque se advierte que en la aplicación sobre monocotiledóneas la eficiencia energética de los emisores de infrarrojos podría ser menor debido al menor índice de área foliar (hojas estrechas y alargadas).

Rovira *et al.*, (2001), analizaron la eficiencia del método de desinfección de malas hierbas por medio de rayos infrarrojos. Evaluaron el emisor de infrarrojo comercializado por Messerli, modelo Puzzy-boy lady, tratando monocotiledóneas (raygrass) y dicotiledóneas (mostaza), encontrando temperaturas en la superficie del substrato entre 50 °C y 80 °C, siendo temperaturas superiores 70 °C las letales. El consumo energético varió entre 45 kg/ha y 111 kg/ha de butano (100%) lo que equivale a 220 kJ/m² y 550 kJ/m² respectivamente. El tratamiento que resultó más efectivo fue para velocidades comprendidas entre 0,003 y 0,006 m/s, siendo más sensible las monocotiledóneas.

En la actualidad diversas marcas comerciales venden quemadores de malas hierbas. De los catálogos se han extraído diversas especificaciones.

Tabla 7. Características técnicas de algunos aplicadores de infrarrojos comerciales

Área efectiva	90x 100 cm	60x 75 cm	30 x 75 cm	25 x 30 cm
Potencia	72 kW	36 kW	18 kW	6 kW
Consumo de gas	6 kg/h	3 kg/h	1,5 kg/h	0,5 kg/h

Como conclusión podemos decir que:

- El infrarrojo no controla eficientemente las malas hierbas; 93% en ray-grass y 42% en Mostaza
- La energía empleada en infrarrojo (2200MJ/ha – 5500 MJ/ha) es similar a la empleada en quemadores de llama (2980 MJ/ha)
- El coste de aplicación con infrarrojos es de aproximadamente 170 Euros/ha, valor 9 veces superior al control con método químico.

II.8 Tratamiento térmico del suelo irradiado por microondas

El tratamiento térmico del suelo por radiación de microondas ofrece múltiples posibilidades de aplicación que abre numerosas vías de investigación en agricultura, para ofrecer nuevas alternativas que permitan una productividad más eficiente y la generación de menos residuos. Estas líneas de investigación han desarrollado los siguientes aspectos:

- Inhibición del crecimiento de ciertas semillas de malas hierbas mediante la aplicación de energía electromagnética. (Davis *et al.*, 1971; Wayland *et al.*, 1973; Barker y Craker, 1991).
- Propiedades dieléctricas de los suelos (Hockstra y Delaney, 1974).
- Aplicación de microondas como agente descontaminante del suelo al permitir la evaporación de productos nocivos tales como PCB's, PAH's tetracloroetileno, etc. (Dev *et al.*, 1986).
- Variación de las propiedades químicas del suelo con la aplicación de calor (Giovannini *et al.*, 1990).
- Eliminación de hongos perjudiciales para diversas cosechas y semillas de soja, trigo y habas (Cavalante y Muchovej, 1993).
- Tratamientos de microondas para la eliminación de nematodos tanto en el suelo (Nelson 1996) como en los productos almacenados (Hamid y Boulanger, 1969).

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

III.1 Objetivo general

Modelar un sistema de convección en el tratamiento térmico de suelos o sustratos agrícolas para su desinfección en continuo mediante aplicación de calor con agua caliente, vapor de agua y aire caliente.

III.2 Objetivos particulares

1. Fijar los fundamentos teóricos y prácticos de los métodos y equipos para aplicar calor con agua caliente, vapor de agua y aire caliente en la desinfección del suelo y sustratos agrícolas en continuo.
2. Determinar los rangos de los parámetros influyentes en el diseño de equipos continuos de desinfección de sustratos agrícolas con agua caliente, vapor de agua y aire caliente en la desinfección del suelo y de sustratos agrícolas.
3. Evaluar la eficiencia de la desinfección en continuo de sustratos agrícolas con calor aplicado mediante aire caliente.

III.3 Hipótesis

1. El sustrato al desplazarse por un cilindro de cierto diámetro rodeado de un fluido de temperatura mayor, absorberá calor manifestando un gradiente concéntrico en el que la temperatura de las capas exteriores será mayor que la temperatura de las capas interiores.
2. La temperatura del sustrato irá aumentando en su recorrido por el intercambiador, existiendo un gradiente longitudinal al cilindro.
3. Cuando el fluido circula en sentido contrario que el suelo o el sustrato la disminución de la temperatura del fluido convector en el intercambiador es menos brusca. La diferencia térmica entre sustrato y fluido en cada punto será menor.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1 Propiedades térmicas de los suelos y sustratos agrícolas

IV.1.1 Dispositivo experimental

Para establecer un modelo teórico del proceso de desinfección de sustratos agrícolas en continuo por sistemas de convección en un intercambiador es necesario estudiar las propiedades térmicas de los mismos, principalmente calor específico, la conductividad térmica y la difusividad térmica. De estos parámetros depende cómo se transmite el calor dentro del suelo o sustrato y su velocidad de propagación. Para determinar el calor específico, la conductividad térmica y la difusividad térmica de los suelos o sustratos a utilizar se diseñó y construyó el dispositivo mostrado en la Figura 44. Se trata de dos cilindros concéntricos, en el cilindro interior se pone el suelo o sustrato, en el espacio anular que existe entre el cilindro interior y el cilindro intermedio se pone agua caliente a una temperatura conocida. El cilindro intermedio está aislado con fibra de vidrio. Por tanto el dispositivo consta de los siguientes elementos.

1. Cilindro exterior: frontera entre la fibra de vidrio y el aire externo
2. Cilindro intermedio: frontera entre el agua que se encuentra en el espacio anular y la fibra de vidrio.
3. Cilindro interior: forma la frontera entre el agua y el suelo o sustrato agrícola.
4. Tapa de los cilindros concéntricos.
5. Termopares: son los sensores para medir la temperatura del agua y del suelo ó sustrato agrícola.
6. DataLogger: es el sistema de adquisición de datos de temperatura y tiempo.

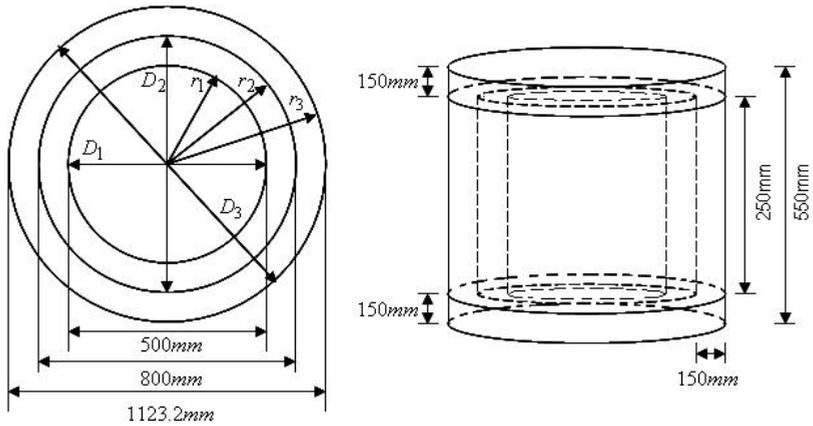


Figura 44. Equipo para determinar el calor específico, conductividad térmica y la difusividad térmica, donde: D_1 - diámetro del cilindro interior donde se coloca el suelo a calentar; D_2 - diámetro del cilindro intermedio concéntrico al anterior; D_3 - diámetro del cilindro externo concéntrico.

En la Figura 45 se puede observar donde fueron insertados los termopares.

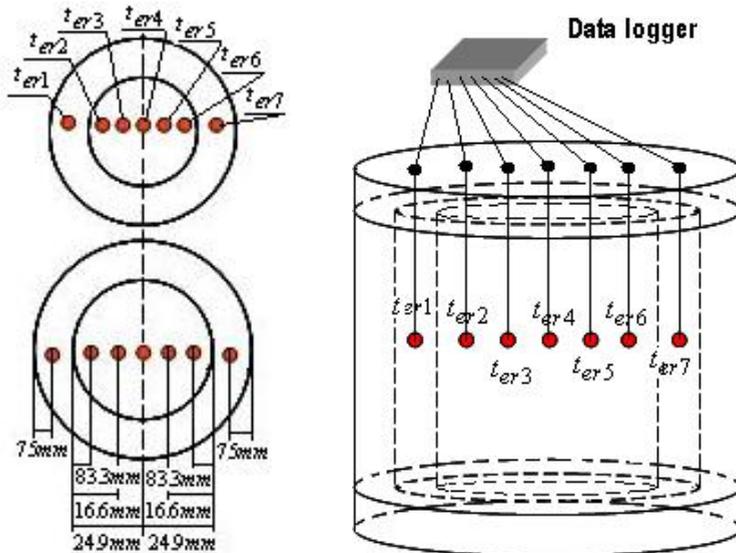


Figura 45. Localización de los termopares



#	ON	Channel	Eqn #	Low	Mid	High	Ext	Realtime
0	YES	Int Temp	45	0	0	0	0	20.51 °C
1	YES	Thermo1	50	-1.5	-1.406	0	0	49.9 °C
2	YES	Thermo2	50	-1.25	-1.328	0	0	43.3 °C
3	YES	Thermo3	50	-0.75	-1.209	0	0	41.2 °C
4	YES	Thermo4	50	-0.5	-1.602	0	0	42.7 °C
5	YES	Thermo5	50	-0.5	-1.445	0	0	46.8 °C
6	YES	Thermo6	50	-1	-1.172	0	0	51.0 °C
7	YES	Thermo7	50	-0.5	-1.133	0	0	51.0 °C

Continuación de la figura 45

El sistema registrador de temperatura consta de siete termopares tipo J y un DataLogger. Dos de los termopares (t_{er1} y t_{er7}) se localizan en polos opuestos en la parte media del espesor de la superficie anular rellena de agua. Cinco termopares (t_{er2} , t_{er3} , t_{er4} , t_{er5} y t_{er6}) se localizan diametralmente en el cilindro central que contiene el suelo, tienen una distribución lineal y se ubican equidistantes a diferentes distancias radiales medidas a partir de polos opuestos y del borde que separa el agua del suelo: dos a 83.33 mm, otros dos a 16.66 mm y uno a 250 mm. Los siete termopares que miden la temperatura del agua y del suelo están localizados a una distancia vertical de 125 mm desde la superficie del agua. El dataLogger registra y almacena los datos de temperatura. El elemento calefactor tiene una potencia de 1500 W. Es un calentador de agua eléctrico adaptado para elevar la temperatura del agua a 75°C. Tiene una capacidad de 76 litros. La temperatura del agua se regula por medio del termostato del calentador. (Figura 46).

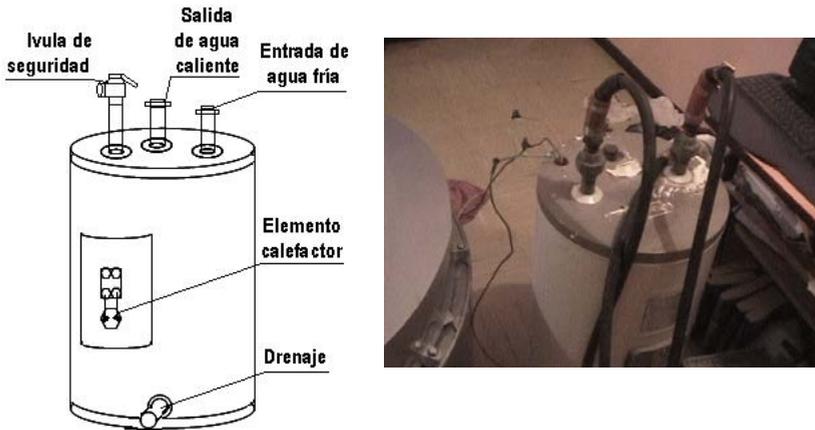


Figura 46. Calentador de agua

El protocolo en cada experimento fue el siguiente:

1. El agua se calentó hasta alcanzar 75 °C en el calentador eléctrico
2. Se adicionó el suelo o sustrato en el cilindro interior.
3. Se introdujeron los termopares en el suelo o sustrato.
4. Se conectaba al DataLogger para el registro de los datos
5. El agua procedente del calentador eléctrico se puso en el volumen anular
6. Se sellaba el equipo con la tapa.

Los datos de temperatura del agua y del suelo ó sustrato se registraron y se almacenaron en el DataLogger. El intervalo de tiempo entre medidas se fijó en 2 minutos. El periodo de tiempo en el cual se registraron datos fue hasta que se alcanzó el equilibrio térmico entre el agua que cedía calor y el suelo ó sustrato que absorbe calor. El despliegue de datos es numérico, en un cuadro de datos, y gráfico. Las temperaturas registradas por cada termopar se pueden ver en tiempo real.

IV.1.2 Determinación del calor específico (C_v), la conductividad térmica (k) y difusividad térmica (D_t)

Estas tres propiedades térmicas se determinaron para un suelo franco arcilloso y para peat moss. Los ejemplos para su obtención se dan solamente para el suelo, pero el mismo procedimiento se utilizó para peat moss.

La determinación del calor específico se realizó mediante dos formas (a) y (b):

a) Mediante la igualdad de las ecuaciones 13 y 14:

$$Q_s = V_s \cdot C_{vs} \cdot (T_{sfinal} - T_{sinicial}) \quad (12)$$

$$Q_a = V_a \cdot C_{va} \cdot (T_{afinal} - T_{ainicial}) \quad (13)$$

Donde: C_{vs} - es el calor específico volumétrico del suelo ($C_{vs} = \rho \cdot C_{suelo}$ ($J m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$)); ρ - es la densidad del suelo, V_s - es el volumen del suelo que hay dentro del intercambiador; C_{va} - es el calor específico volumétrico del agua; ρ_a - es la densidad del agua, V_a - es el volumen del agua que hay dentro del intercambiador.

Para la determinación de C_{vs} es necesario esperar a que se equilibren las temperaturas del agua y del suelo. Se evaluaron los efectos del grado de compactación GC, humedad W y su interacción GCxW en el calor específico a través de un análisis de varianza.

b) Cada termopar del suelo registra valores de temperatura en función del tiempo T(t).

Con los puntos registrados se realizan regresiones de T(t) que por lo general son ecuaciones lineales. Por tanto las derivadas de estas funciones son constantes.

$$\frac{dT_{agua}}{dt} = \text{constante 1} \quad (14)$$

$$\frac{dT_{suelo}}{dt} = \text{constante 2} \quad (15)$$

Con los registros de los termopares sumergidos en el agua se obtiene la ecuación 16 de donde se calcula $\frac{dQ}{dt}$

$$\frac{dQ}{dt} = M_{agua} \cdot C_{agua} \cdot \frac{dT_{agua}}{dt} \quad (16)$$

Como se conoce también la variación de temperatura en función del tiempo en el suelo a partir de la ecuación 17 se calcula C_{vsuelo} del suelo.

$$\frac{dQ}{dt} = M_{suelo} \cdot C_{suelo} \cdot \frac{dT_{suelo}}{dt} \quad (17)$$

Donde: dQ/dt - es el flujo de calor en función del tiempo (cedido por el agua o ganado por el suelo), kJ s^{-1} ; dT_a/dt - es la razón de cambio de la temperatura del agua en función del tiempo, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$; dT_s/dt - es la razón de cambio de la temperatura del suelo en función del tiempo, $^{\circ}\text{C s}^{-1}$; m_a - es la masa de agua, kg ; m_s - es la masa de suelo, kg ; C_{Pa} - es el calor específico del agua, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Para determinar la conductividad térmica también se utilizaron dos procedimientos:

a) Con base a la ecuación 18 se obtiene la conductividad térmica k , por lo tanto:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{k \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot dT}{dr} \quad (18)$$

$$k = \frac{dQ/dt}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{dT}{\ln r}} \quad (19)$$

b) Dado que se tiene una distribución radial de temperaturas $T(r)$, mediante la cual se obtienen regresiones lineales. Por tanto se puede calcular:

$$\frac{dT}{dr} = \text{constante 3} \quad (20)$$

Como $\frac{dQ}{dt}$ y $\frac{dT}{dr}$, son conocidos, se puede emplear la ecuación 21 para calcular la conductividad térmica, k , para cada distancia radial.

$$k = \frac{dQ/dt}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{dT}{dr}} \quad (21)$$

Donde: k es la conductividad térmica, $\text{kJ cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$; dQ/dt es el flujo de calor en el suelo, kJ s^{-1} , dT/dr es la razón de cambio de temperatura con respecto a la distancia radial (logaritmo natural de la distancia radial), $^\circ\text{C cm}^{-1}$; r es la distancia radial, cm; L es la longitud del volumen de suelo considerado, cm.

Los cálculos se realizaron para dos grados de compactación GC y tres humedades W. Por otro lado se estudió la interacción GC*W (Grado de compactación*Humedad gravimétrica) para un suelo franco arenoso y un sustrato peat moss. Para el análisis de los datos se utilizó el Sistema para Análisis Estadístico SAS (Statistical Analysis System).

La difusividad térmica es combinación de C_s y k . El grado de compactación se estudió a dos niveles y la humedad se evaluó a tres niveles. Esto supone que el diseño de tratamientos se realizó con un experimento factorial 2x3. Los niveles estudiados para cada factor en el suelo franco arenoso se indican en la Tabla 8. Los niveles estudiados para cada factor en el sustrato Peat moss se indican en la Tabla 9.

Tabla 8. Niveles estudiados en los factores para el suelo franco-arenoso

Factor	Niveles		
	1	2	3
Grado de compactación (densidad aparente)	1051,10 kg m^{-3}	1153,25 kg m^{-3}	-
Humedad	3,56 %	17,26 %	23,40 %

Tabla 9. Niveles estudiados en los factores para el sustrato Peat moss

Factor	Niveles		
	1	2	3
Grado de compactación (densidad aparente)	271,68 kg m^{-3}	328,783 kg m^{-3}	-
Humedad	59,64 %	94,13 %	335,88 %

El conjunto de experimentos realizados para cada tipo de suelo se muestra en la Tabla 10. Las variables respuesta fueron temperatura, calor específico (C_p), conductividad térmica (k) y difusividad térmica (D_T). Se realizaron tres repeticiones para cada tipo de experimento. Se realizó un análisis de varianza para evaluar los efectos de los distintos factores en las variables estudiadas.

Tabla 10. Experimentos realizados para el análisis de las propiedades térmicas

	Nivel analizado en cada factor		Repeticiones (N)
	GC	W	
Experimento 1	1	1	9
Experimento 2	1	2	9
Experimento 3	1	3	9
Experimento 4	2	1	9
Experimento 5	2	2	9
Experimento 6	2	3	9

IV.1.3 Relación de k y C_p con el diámetro y longitud de un intercambiador de calor para pasteurización ó desinfección de suelos y sustratos agrícolas

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido el diseño de un intercambiador de calor para la desinfección de suelos cilíndrico de forma que el suelo discorra longitudinalmente desde una de sus bases hasta la opuesta. Conociendo la velocidad con la que se propaga el calor dentro del suelo se estimó la longitud que debe utilizarse en el intercambiador para que el suelo no esté un tiempo excesivo en él. Para que el suelo se caliente uniformemente es necesaria una longitud mínima en el intercambiador. Los parámetros diámetro r y longitud L están relacionados con la velocidad de propagación del calor en el suelo y se estimaron en este experimento. Para ello ha sido necesario realizar una serie de simplificaciones:

1. El calentamiento se produce exclusivamente por conducción. Entonces la transferencia de calor seguirá la Ley de Fourier:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

2. El espesor de suelo ó sustrato a calentar será igual al radio de la tubería, que es la suposición más desfavorable. Hay que tener en cuenta que en el centro de la tubería está el tornillo sinfín que desplaza el suelo, por tanto, el espesor de suelo a calentar será menor. De aquí se tiene la ecuación de Fourier como:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr} \quad (23)$$

3. El calor que debe ser absorbido por el suelo será:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V_s \cdot C_{vs} \cdot dT}{dt} \quad (24)$$

Donde C_{vs} es el calor específico volumétrico del suelo ($C_{vs} = \rho_s \cdot C_s$ ($\text{kJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)), ρ es la densidad del suelo, kg m^{-3} , V_s es el volumen del suelo dentro del intercambiador, m^3 .

Además: $V_s = \pi \cdot r^2 \cdot L$, por tanto igualando las ecuaciones (23) y (24)

$$k \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dT}{dr} = \frac{V_s \cdot C_{vs} \cdot dT}{dt}$$

$$2k \cdot dt = r \cdot C_{vs} \cdot dr$$

$$\int_{r_1}^{r_2} 2k \cdot dt = \int_{r_1}^{r_2} r \cdot C_{vs} \cdot dr$$

$$2k \cdot \Delta t = \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right) C_{vs}$$

Si $r_1=0$

$$r_2 = \sqrt{\frac{4k}{C_v} \cdot \Delta t} \quad (25)$$

Debe fijarse un tiempo máximo para que suba la temperatura del suelo y después ésta se mantenga hasta que se realice la desinfección. A mayor tiempo de exposición el radio puede ser más grande. Para que el suelo se caliente de forma instantánea el radio debe ser 0.

Fijando un caudal de circulación de suelo mínimo, $q_s = \frac{V_s}{\Delta t}$, se puede determinar la longitud, L .

$$q_s = \frac{V_s}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad q_s = \frac{L \cdot \pi \cdot r^2}{\Delta t} \quad (26)$$

Basado en estas ecuaciones el procedimiento de diseño de un desinfectador cilíndrico donde el suelo se desplazase longitudinalmente mientras absorbe el calor de desinfección pasaría por los siguientes pasos:

1. Determinación de la temperatura que es necesario alcanzar en la masa de suelo para hacer efectiva la desinfección, junto con el tiempo que es necesario mantener esa temperatura.
2. Cálculo del calor necesario aportar al suelo o sustrato por unidad de tiempo para alcanzar esa temperatura y mantenerla el tiempo requerido
3. Determinación del tiempo de desinfección en función del radio
4. Determinación del radio
5. Determinación de la longitud

IV.2 Determinación de coeficientes de película

Para la determinación de los coeficientes de película fue construido un dispositivo experimental formado por un intercambiador cilíndrico. Dicho dispositivo estaba constituido por dos tuberías concéntricas. Por la central circula el sustrato impulsado por un tornillo sinfín, por la externa circula un fluido caliente, bien vapor de agua, aire seco caliente ó agua caliente. Las tuberías externa e interna están formadas por acero inoxidable ya que es un material buen conductor térmico y además resistente a la corrosión. La tubería externa está cubierta por material aislante térmico de fibra de vidrio (Figura 47). Como base del modelo se considera que el sustrato circulando por la tubería interna impulsado por el tornillo sinfín se comporta como un fluido. Entonces, el sistema planteado supone un proceso de transmisión de calor por convección por paredes cilíndricas. El calor se transmite desde el exterior al interior, por lo tanto existen tres fases en la transmisión:

1. El calor se trasmite del fluido de la tubería exterior (vapor de agua, agua caliente ó aire seco caliente) hacia el interior a la chapa de acero intermedia por convección.

$$\frac{dQ}{dt} = h_e \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{fluido} - T_{chapaext}) \rightarrow$$

$$T_{fluido} - T_{chapaext} = \frac{1}{h_e \cdot \pi \cdot d_1} \frac{1}{L} \frac{dQ}{dt} \quad (27)$$

2. El calor circulará por el espesor de la chapa de acero por conducción, (aunque el espesor será muy pequeño)

$$\frac{dQ}{dt} = k_1 \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{r_1}{r_{int}}} (T_{chapa ext} - T_{chapa int}) \rightarrow$$

$$T_{chapa ext} - T_{chapa int} = \frac{1}{2k_1} \frac{1}{\pi \cdot L} \frac{dQ}{dt} \ln \frac{r_1}{r_{int}} \quad (28)$$

3. Finalmente el calor es transmitido de la chapa al flujo de suelo de nuevo por convección.

$$\frac{dQ}{dt} = h_i \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{chapa int} - T_{suelo}) \rightarrow T_{fluido} - T_{chapa} = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot d_1} \frac{1}{L} \frac{dQ}{dt} \quad (29)$$

Donde: L es la longitud del intercambiador; $T_{chapa ext}$ es la temperatura en la cara externa de la chapa de acero inoxidable; $T_{chapa int}$ es la temperatura en la cara interna de la chapa de acero inoxidable; T_{fluido} es la temperatura del fluido convector; T_{suelo} es la temperatura alcanzada por el suelo.

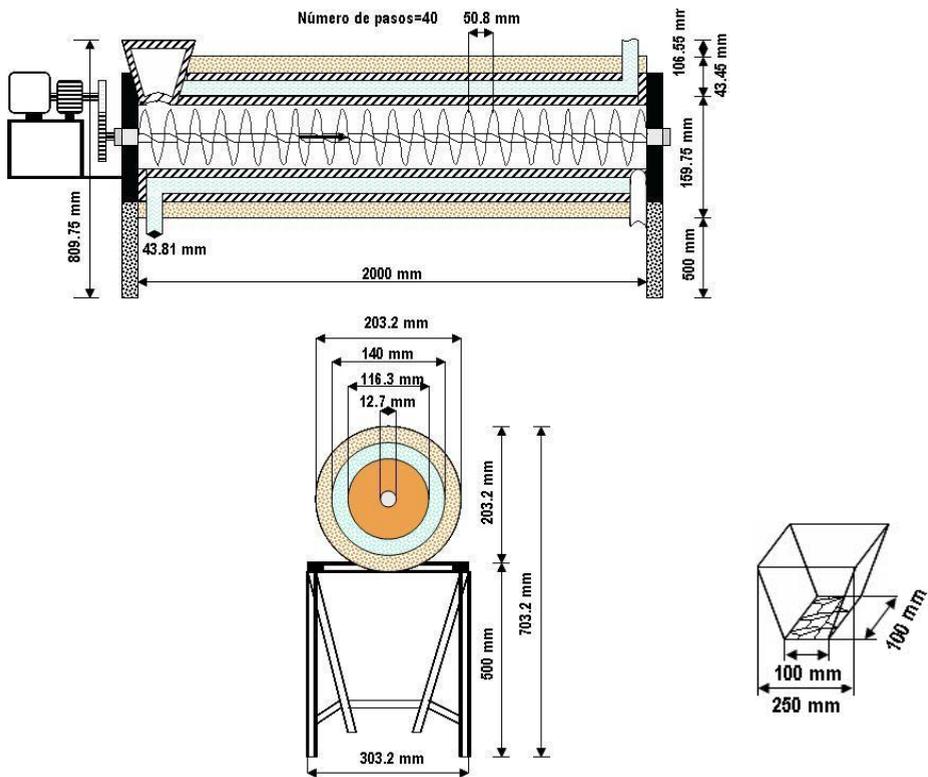


Figura 47. Dimensionamiento del intercambiador de calor

El intercambiador de calor está diseñado para trabajar con tres fluidos caloportadores, agua caliente, vapor sobrecalentado y aire caliente. Los dispositivos experimentales se muestran en las Figuras 48, 49 y 50.

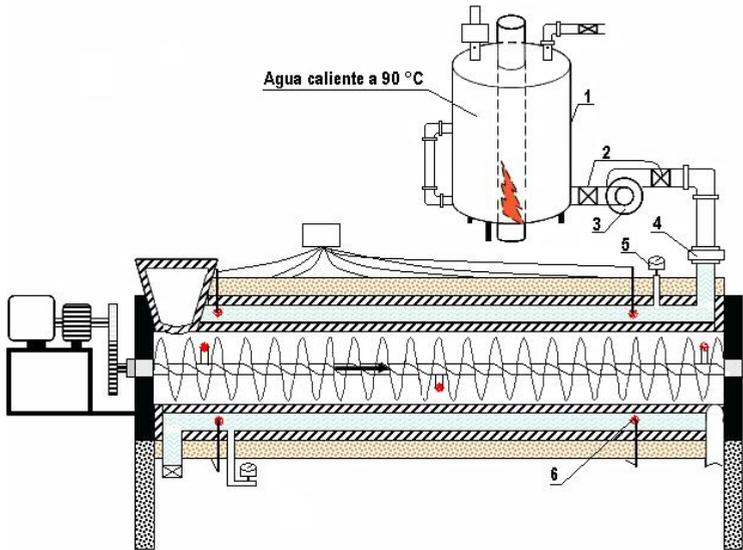


Figura 48. Esquema del modulo de desinfección por agua caliente y sistema de control de temperatura, donde: 1 – Caldera; 2 – Válvulas tipo esfera; 3 – Bomba; 4 – Tuerca unión; 5 – Manómetro; 6 - Termopar.

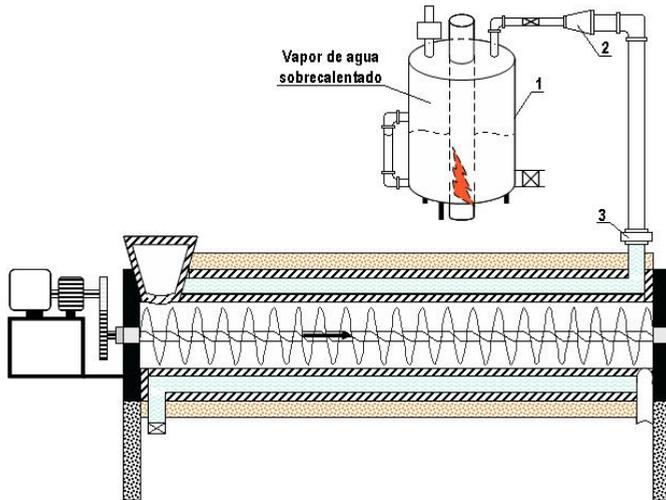


Figura 49. Sistema de aplicación vapor de agua, donde: 1 – caldera; 2 – Reducción tipo campana; 3 – Tuerca unión.

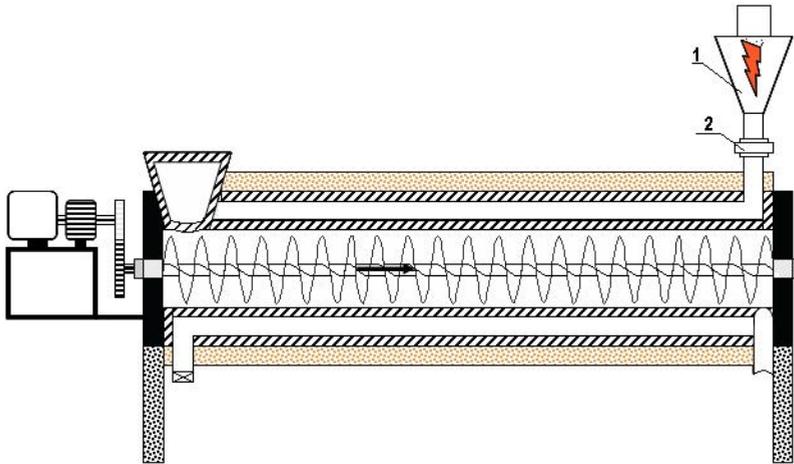


Figura 50. Sistema de aplicación aire caliente, donde: 1 – Quemador; 2 – Tuerca unión.

Para el dimensionado del tornillo sinfín, las revoluciones por minuto de la flecha, capacidad volumétrica real, potencia requerida, y torque fueron calculados. Para la aplicación de agua caliente y vapor de agua se diseñó y construyó un generador de vapor de agua de 0,153 CV (caballos de vapor). También se instrumentó una caldera de tamaño pequeño de 0,8 CV. Para probar como fluido convector aire caliente, se diseñó un calentador de aire compuesto por 4 resistencias planas de 550 W cada una, un ventilador de 1/25 CV y un termostato. Para registrar la temperatura se instalaron 3 termopares tipo J en el espacio anular para registrar la temperatura del fluido convector. Para registrar la temperatura del suelo o sustrato se instalaron 4 termopares en el cilindro concéntrico interior. También se instaló un termómetro bimetalico en la entrada y salida del fluido caliente.

El coeficiente de película entre el fluido caloportador utilizado para calentar el suelo en el sistema puede ser calculado a partir del número de Nussel para diferentes diámetros y velocidades de circulación. La conductividad del acero inoxidable también es un dato conocido. Por tanto, para que el sistema quede determinado es necesario calcular el coeficiente de película del suelo considerado como un fluido. Este se determinó mediante el dispositivo experimental. La determinación experimental se realizó de la siguiente manera:

- En la práctica la chapa de acero inoxidable es muy fina, por lo que:

$$d_1 \approx d_{\text{int}} \rightarrow \ln \frac{\eta}{r_{\text{int}}} \approx 0 \rightarrow$$

$$T_{\text{chapaext}} - T_{\text{chapa int}} = \frac{1}{2k_1} \frac{1}{\pi \cdot L} \frac{dQ}{dt} \ln \frac{\eta}{r_{\text{int}}} = 0 \quad (30)$$

- El calor cedido por el fluido convector utilizado (aire seco caliente) se calculó a partir de la variación de temperatura experimentada en el intercambiador.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_v \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}) \quad (31)$$

- El calor cedido por el fluido es ganado por el sustrato agrícola

$$\dot{Q} = h_i \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{\text{chapa int}} - T_{\text{suelo}}) \quad (32)$$

igualando las ecuaciones 31 y 32 se obtiene el coeficiente de película del suelo.

$$\dot{m} \cdot C_v \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}) = h_i \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{\text{chapa int}} - T_{\text{suelo}})$$

$$h_i = \frac{\dot{m} \cdot C_v \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})}{\pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{\text{chapa int}} - T_{\text{suelo}})} \quad (33)$$

La experimentación debe necesariamente determinar el gradiente decreciente de temperaturas del fluido convector utilizado y el gradiente creciente de temperaturas en suelo a lo largo de su camino en el intercambiador. Esto obligó a insertar termopares en las conducciones y conectarlos a un registrador (datalogger).

Considerando que el coeficiente de película varía de unos sustratos a otros se estudiaron:

- Dos tipos de sustratos.
- Dos humedades.
- Dos tiempos de desinfección.
- Tres fluidos convectores (agua caliente, vapor de agua y aire caliente)

Para la construcción de los cilindros concéntricos y la tolva de entrada y la salida del sustrato se utilizó lámina de acero inoxidable calibre 18. Para la helicoide del tornillo sin fin se utilizó varilla de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. Para la construcción de la estructura ó bastidor se utilizó perfil de PTR de $\frac{1}{2}$ ".



a)



b)



c)

Figura 51. a) Cilindros concéntricos, b) Bastidor del aparato, c) Tornillo sin fin



Figura 52. Fabricación de uno de los anillos de unión

La Figura 53 muestra las dimensiones de separación entre termopares que median la temperatura.

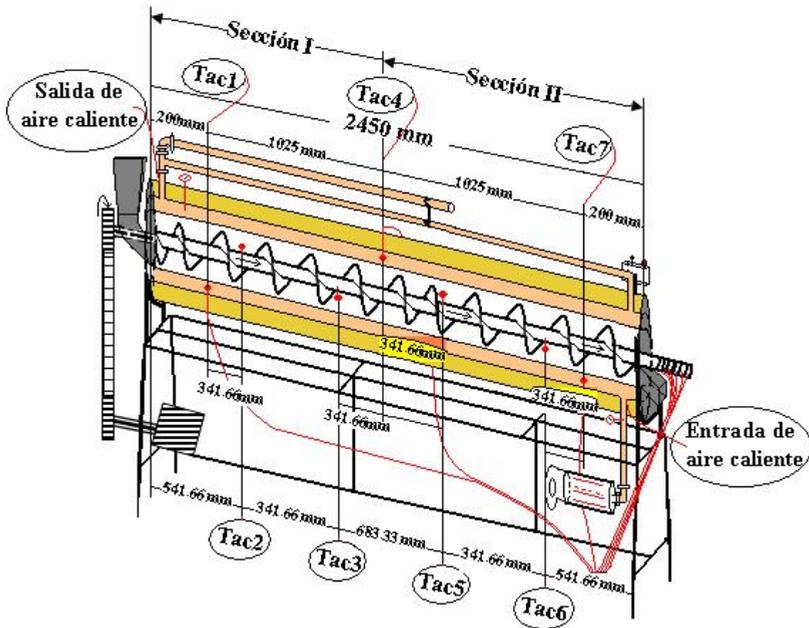


Figura 53. Separación entre termopares, donde: Tac1 – Temperatura del aire caliente registrada por el termopar 1 (a la salida del aire caliente); °C; Tac4 – Temperatura del aire caliente registrada por el termopar 4 (en la parte media del recorrido del aire caliente); °C; Tac7 – Temperatura del aire caliente registrada por el termopar 7 (a la entrada del aire caliente); °C; Ts2 – Temperatura del sustrato registrada por el termopar 2, °C; Ts3 – Temperatura del sustrato registrada por el termopar 3, °C; Ts2 – Temperatura del sustrato registrada por el termopar 5, °C; Ts2 – Temperatura del sustrato registrada por el termopar 6, °C.

Las temperaturas del fluido caliente (aire caliente) se registraron como Tac1, Tac4 y Tac7, y corresponden a las temperaturas registradas con respecto a la entrada del aire caliente a los 2250 mm, 1225 mm y 200 mm. Las temperaturas Tac1 y Tac7 son las temperaturas de salida y entrada del recorrido respectivamente. La temperatura Tac4 es la temperatura de la parte media del recorrido del aire caliente.

Las temperaturas del fluido frío (tezontle rojo o peat moss) se registraron como T_{emAmb} , T_{s2} , T_{s3} , T_{s5} y T_{s6} , y corresponden a las temperaturas registradas con respecto a la entrada de la tolva a los 0,0 mm, 541,6 mm, 883,2 mm, 1566,6 mm y 1908,3 mm respectivamente, ésta última posición es a la salida del tezontle o peat moss.

Para la determinación de coeficiente de película se tomó en cuenta la productividad del aparato, la cual fue de 47,67 litros por hora. Para calcular el flujo másico del fluido caliente se utilizó la ecuación 26. Para calcular los valores del coeficiente de película (h_i) se utilizó la ecuación 34. Para calcular el calor cedido por el agua (Q_{ac}) y el calor ganado por el sustrato suelo (tezontle rojo o peat moss) (Q_{TEZ} y Q_{peat}) se utilizaron las ecuaciones 12 y 13. Los datos se analizaron mediante el paquete computacional Sistema para Análisis Estadístico SAS (Statistical Anlysis System).

El sustrato utilizado fue tezontle rojo. Para calcular las variables termodinámicas h_i , Q_{ac} , y Q_{TEZ} se sensó la variación de temperatura las temperaturas $\Delta T = T_1 - T_2$, donde: T_1 - Temperatura del fluido caliente y T_2 - temperatura del fluido frío.

IV.3 Verificación de la desinfección de patógenos mediante el sistema diseñado

IV.3.1 Preparación de las muestras

Para la comprobación de la eficiencia del equipo de desinfección se utilizaron aislamientos monoconidiales del hongo *Fusarium oxysporum licoperlisi*. Las Figuras 54 y 55 muestran la vista del hongo a través del microscopio y el crecimiento de su micelio en medio de cultivo Papa-Dextrosa-Agar respectivamente.



Figura 54. Conidios vistos desde un microscopio a 40x



Figura 55. Aislamientos monoconidiales de *Fusarium oxysporum lycopersici*

Con estos hogos fueron contaminados dos tipos de sustratos: **Tezontle rojo y Peat moss**. El **Tezontle rojo** se obtuvo de la mina de Totolapan, municipio de Texcoco Estado de México (Figura 56). El **Peat moss** se compró de una tienda de insumos agrícolas (Figura 57).



Figura 56. Tezontle rojo en la mina



Figura 57. Peat moss

Con la finalidad de evitar la presencia de cualquier otro hongo que pudiera alterar el experimento, antes de inocular los hongos en los sustratos, éstos fueron esterilizados. El **Peat moss** con una olla de presión y, el sustrato Tezontle rojo con un remolque para desinfección de sustratos en estático con aire caliente (Chávez *et al.*, 2009). La desinfección con la olla de presión se llevó a cabo en una olla de presión a 120 °C y a 1kg/cm² durante 15 minutos (Figura 58).



Figura 58. Esterilización del sustrato con la olla de presión

El remolque para desinfección de sustratos en estático tenía una capacidad de 400 litros, y sometía el sustrato a una temperatura de 71°C mediante la aplicación de aire caliente durante ocho horas (Figura 59).



Figura 59. Remolque para la desinfección de sustratos en estático

Una vez el sustrato quedaba estéril se inoculaba con el hongo a evaluar. El proceso de obtención del inóculo comprendió desde la preparación del medio de cultivo (PDA y Agar-agra) en donde se desarrollaron las colonias del hongo, hasta los aislamientos a partir de una cepa para finalmente obtener un hongo puro. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Preparación del medio de cultivo Papa-Dextrosa-Agar (PDA): En un matraz se mezclaron 20 g de PDA con medio litro de agua destilada. Esta mezcla se puso en la olla a presión a una temperatura de 121° C durante 15 minutos. Al enfriarse se vació la mezcla en cajas Petri en la cámara de flujo laminar para evitar contaminación.

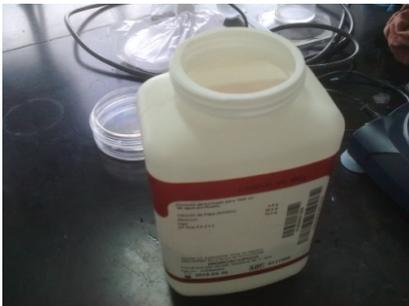


Figura 60. Medio PDA preparado en polvo



Figura 61. Medio en la olla de presión



Figura 62. Medio en la cámara estéril

Preparación del medio de cultivo Agar-Agua: La preparación de este medio de cultivo es similar al anterior, solo que en este caso se utilizó medio Agar-Agua, el cual se encuentra en el mercado en la misma presentación que el medio PDA. Por lo tanto, solo se le tuvo que adicionar agua y ponerlo a esterilizar. El desarrollo de bacterias en este tipo de medio de cultivo es menos común, por lo que se justifica su uso cuando el propósito es obtener aislamientos de hongos puros y evitar un poco la contaminación. La preparación de este medio fue una dilución a razón de 5 gramos de Agar por medio litro de agua estéril.



Figura 63. Medio Agar en su presentación del mercado



Figura 64. Medio Agar-Agua preparado



Figura 65. Agar en polvo



Figura 66. Caja Petri con medio Agar-Agua

Los hongos a inocular se tenían conservados bajo refrigeración en aislamientos puros en suspensiones de baja concentración de conidios en agua estéril, previamente preparados a partir de una sola espora. De dicha suspensión se vertió un mililitro en cada una de las cajas Petri, tanto en las que tenían medio agar-agua como las que tenían PDA, y se dispersó con una varilla de vidrio (o triángulo) estéril. Posteriormente se observó la germinación de los conidios bajo el estereoscopio a intervalos de tiempo regulares (24, 48 y 72 horas). Cuando éstos iniciaron su germinación, con una aguja previamente esterilizada a la llama se tomó una porción del cultivo donde se encontraban éstos y se ubicaron los conidios en nuevas placas de medio de cultivo, para que su crecimiento fuera completamente aislado. Se mantuvieron las cajas en la incubadora a temperatura de 22-24°C. Se vigiló el crecimiento de cada colonia obtenida, para desechar aquellas con contaminación.



Figura 67. Vaciado de la suspensión en la caja Petri



Figura 68. Cajas petri con hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*

Una vez el hongo estaba completamente desarrollado, para obtener el

inóculo se agregaron 10 ml de agua destilada en cada caja petri. Se hizo un raspado del micelio con la ayuda de un portaobjetos, y se vertió en un vaso de precipitados haciendo pasar el líquido por una malla para eliminar el agar o restos de micelio que podrían obstruir el paso de la suspensión a través del aspersor durante la inoculación.



Figura 69. Raspado del micelio



Figura 70. Eliminación del micelio mediante la manta de cielo

En un matraz se depositó el contenido de 12 cajas Petri y se adicionó agua destilada hasta obtener un volumen de 1200 ml. De esta solución se tomaron las muestras para hacer el conteo de esclerocios de hongos en la cámara “Neubauer”. Estas consisten en una lámina portaobjetos con resaltes en los lados que sostienen un cubreobjetos a una distancia de 0.1 mm por encima encerrando una cámara subdividida en 9 celdas cuadrangulares con 1 mm de lado de volumen conocido. Por consiguiente el conjunto de las celdas forman 9 mm². Se contaron sistemáticamente el contenido de cinco; los cuatro de las esquinas y el central (A,B,C,D, y E) para calcular la concentración de propágulos.



Figura 71. Solución madre



Figura 72. Cámara de Neubauer



Figura 73. Microscopio estereoscópico electrónico



Figura 74. Cámara Neubauer



Figura 75. Tween 20

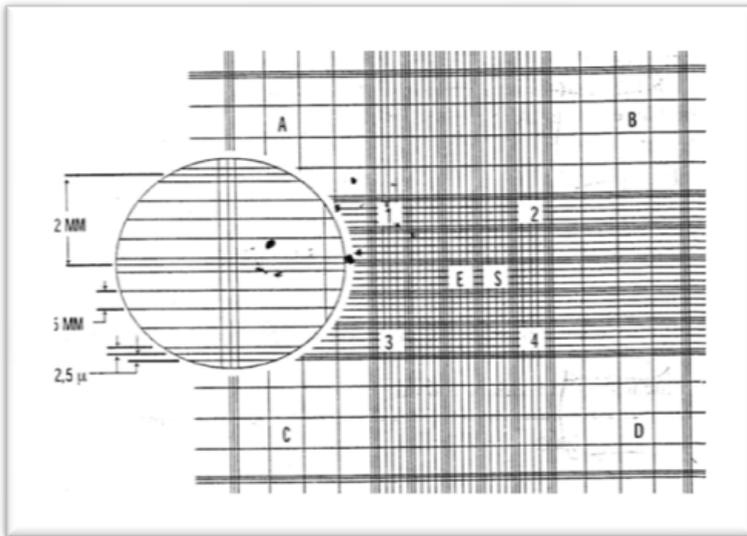


Figura 76. Rayado de “Neubauer” hematocímetro Spencer:: cuadrados principales (C.P) de 1 mm por lado y cuadrados secundarios (C.S) de 0.2 mm por lado

Para el conteo de propágulos más pequeños se realizaron conteos en cámaras de contaje para microscopio compuesto a partir de alícuotas de suspensiones de los mismos. Para el uso de la cámara de contaje se preparó una suspensión de los propágulos a contar en agua, de mayor concentración que la deseada, agregándoles “Tween 20” (un detergente). Entre cada observación se limpiaron las superficies de la cámara con agua de una pipeta y se secaban con papel de lente o papel absorbente. Se colocaba el cubreobjeto sobre los rieles paralelos a ambos lados de la cámara, frotando ligeramente para conseguir buen contacto. Con el uso de una jeringa se tomó una muestra de la suspensión y se aplicó a la ranura del centro de cada una de las cámaras donde fue absorbida rápidamente por la fuerza capilar. Siempre que se hacía esta operación con extremo cuidado dado que es muy importante quitar la jeringa a tiempo para que no entre un exceso de solución rebose en los bordes, pues esto introduciría un factor de error. Se montaba al microscopio ubicando el rayado de una de las cámaras. Una vez que se ubicaron todos los cuadros del rayado de la cámara se hicieron conteos de los cuadros A, B, C y D (CP) de la siguiente manera: en cada uno de ellos se contaron los conidios de los 16 cuadros secundarios (CS), multiplicando la suma de estos por 2000 y obteniendo con ello la cantidad de conidios por cada cuadro principal. En el caso del cuadro E se hizo el conteo de 25 cuadros secundarios que contiene y de la misma forma la suma de éstos se multiplicó por 2000. Los propágulos que estaban sobre las líneas de los

márgenes de los cuadros solo se contaron en dos de éstos, los de lado izquierdo y superior. Se repitió el paso anterior para el segundo rayado de la cámara y los pasos anteriores para tres rayados más obteniendo con esto cinco repeticiones, las cuales se promediaron para obtener el conteo total. Por último se calculó el volumen necesario para llevar la suspensión de propágulos a la concentración deseada (propágulos/cc deseada).

Inoculación del sustrato. El volumen de sustrato utilizado por tratamiento fue de 30 litros. La masa de cada uno de ellos fue:

Para el tezontle rojo: Considerando una densidad $\rho = 1,057 \text{ kg/l}$, dato obtenido en la experimentación. La masa de cada tratamiento resultó $m = 1,057 \text{ kg/litro} \cdot 30 \text{ litros} = 31,71 \text{ kg}$. Por lo tanto la masa total para los 4 tratamientos fue de:

$$m = 1,057 \text{ kg/litro} \cdot 120 \text{ litros} = 126,82 \text{ kg} .$$

Para el sustrato Peat moss: $\rho = 0,175 \text{ kg/l}$, dato obtenido en la experimentación. Resultó $m = 5,25 \text{ kg}$ de sustrato peat moss por tratamiento. La masa total de growing mix 1VM (peat moss) requerida para los 4 tratamientos se calculó tomando en cuenta la densidad y el volumen total del mismo. Resultando

$$m = 0,175 \text{ kg/litro} \cdot 120 \text{ litros} = 21 \text{ litros} .$$

Para el testigo se utilizaron 30 litros de tezontle y 30 litros de Peat moss (distribuidos en las 3 repeticiones de cada uno). Teniendo por lo tanto, 31,71 kg de tezontle y 5,25 kg de Peat moss. Como se observa es la misma cantidad aplicada para los tratamientos.

Por lo anterior, se utilizaron 26,25 kg de Peat moss y 158,55 kg de tezontle, dando como resultado 184,8 kg en total. De la cantidad anterior se partió para calcular la cantidad necesaria de solución madre para la inoculación del sustrato.

La cantidad de inóculo utilizado fue a partir de una concentración de 10000 conidios/g de sustrato y 1.000.000 conidios/ml de agua. Esto significa que en 100 g de sustrato se aplicó 1ml de solución madre. La cantidad de sustrato fue; 184,8 kg en total. Por lo tanto la solución madre necesaria fue de:

$$\frac{184800 \text{ g de sustrato}}{100 \text{ g de sustrato/ml}} = 1848 \text{ ml} \tag{34}$$

distribuidos en 317,1 ml de solución para cada tratamiento de Tezontle y 52,5 ml de solución para cada tratamiento de Peat moss.

En la Tabla 11 se muestran los resultados de los cuadros de conteo (A, B, C, D y E) con las cinco repeticiones que se realizaron. La concentración de la solución se obtuvo multiplicando el valor de la media por una constante (2000), de esa manera se obtuvo la concentración en conidios/ml (Gilchrist et al; 2005). $1584,4 \cdot 2000 = 3,168,800$ conidios/ml

Tabla 11. Número de conidios o propágulos resultados del conteo de la cámara Neubauer

Repetición	A	B	C	D	E	Suma
1	341	310	354	345	300	1650
2	339	333	354	325	300	1651
3	330	297	343	308	293	1521
4	322	332	325	302	323	1604
5	266	293	312	281	294	1446
					Total	7922
					Media	1584,4

Así la concentración madre contiene 3168800 conidios/ml, para llevarla a la concentración deseada se tiene: $C_1V_1 = C_2V_2$; Donde: C_1 = concentración inicial, 3168,800 conidios/ml; V_1 = Volumen inicial, 1200 ml; C_2 = concentración final deseada 1.000.000 conidios/ml; V_2 = volumen final, desconocido. Despejando se tiene $V_2 \cdot C_1 \cdot V_1 / C_2$, sustituyendo datos se tiene $V_2 = 3.168.800 \cdot 1200 / 1.000.000 = 3802,56$ ml .

A esta cantidad solo se resta 1200 ml para conocer el volumen de agua faltante (V_f) para lograr la concentración de 1.000.000 conidios/ml. $V_f = 3802,56 \text{ ml} - 1200 \text{ ml} = 2602,56 \text{ ml}$

Por lo que se agregaron 2602,56 ml más para obtener la concentración deseada en la solución madre. Esto significa que de los 3802,56 ml de solución disponible, únicamente se aplicaron los 1848 ml necesarios y el resto se considera un sobrante.

IV.3.2 Tratamientos con aplicación de calor mediante fluidos

Los tratamientos quedaron definidos por el tiempo de recorrido del sustrato en el aparato y el contenido de humedad. El tiempo de recorrido del sustrato en el intercambiador ensayado fue de 25 y 30 minutos. El contenido de humedad para tezontle rojo en promedio fue de 11,77 % y 15,08 %, para peat moss fue de 25,07 % y 32,20 %. En la Tabla 12 se definen los tratamientos para cada sustrato.

Tabla 12. Nomenclatura y características de los tratamientos

Sustrato	Tratamiento	Características
Tezontle	T1	Tiempo de desinfección de 25 min, sustrato utilizado tezontle y humedad al 15,67%
	T2	Tiempo de desinfección de 25 min, sustrato utilizado tezontle y humedad al 12,32%
	T3	Tiempo de desinfección de 30 min, sustrato utilizado tezontle y humedad al 14,41%
	T4	Tiempo de desinfección de 30 min, sustrato utilizado tezontle y humedad al 11,23%
	T5	Testigo tezontle (no tratado térmicamente)
Peat moss	T1	Tiempo de desinfección de 25 min, sustrato utilizado Peat moss y humedad al 32,31%
	T2	Tiempo de desinfección de 25 min, sustrato utilizado Peat moss y humedad al 26,08%
	T3	Tiempo de desinfección de 30 min, sustrato utilizado Peat moss y humedad al 32,1%
	T4	Tiempo de desinfección de 30 min, sustrato utilizado tezontle y humedad al 24,07%
	T5	Testigo Peat moss (no tratado térmicamente)

En el Laboratorio de Micología del Departamento Parasitología Agrícola de la Universidad de Chapingo se analizaron las muestras tras los tratamientos.

1. En cada repetición se depositaron en un matraz 10 g de la muestra con 90 ml de agua destilada esterilizada, agregando también una gota de “Tween” para dispersar de manera homogénea los posibles conidios existentes.
2. 1 ml de la solución se depositó en cada caja Petri en la cámara de flujo laminar, utilizando por cada repetición 4 cajas petri previamente preparadas con medio de cultivo Papa-Dextrosa-Agar.
3. Estas muestras se observaron por 5 días para cuantificar el número de unidades formadoras de colonias (UFC).

IV.3.3 Metodología empleada para obtener el índice de incidencia del hongo

Para obtener el índice de incidencia del hongo sobre las plantas de jitomate cultivado sobre los sustratos tratados se sembraron semillas, desarrollándose la planta hasta su etapa de trasplante de un mes a 40 días. Ello permitió comparar tratamientos.

Todas las labores de cultivo aquí mencionadas se aplicaron tanto en los tratamientos como en el testigo.

Siembra. Se pusieron a germinar semillas de jitomate rojo (*Lycopersicon esculentum* L.) en charolas de poliestireno. La variedad sembrada fue *Rio grande*. Cuando las plantas tuvieron dos hojitas se les aplicaron riegos con fertilizante. La fórmula contenida en dicho fertilizante fue 0-40-40 (N, P, K, respectivamente). Los riegos con fertilizante se aplicaron cada tres días, hasta cumplir unas tres semanas a partir de la siembra (los días que no se aplicó fertilizante se aplicó agua natural).



Figuras 77. Plantas contenidas en las charolas de poliestireno y el Fertilizante aplicado

Trasplante. Se trasplantaron 10 plantas por cada repetición (3 repeticiones) de cada tratamiento. Teniendo 30 plantas por tratamiento y (240 plantas en total). El trasplante de estas plantas se realizó en el sustrato ya tratado (sustrato desinfectado por el aparato) en macetas de plástico. Colocando 2 plantas en cada maceta.



Figuras 78. Trasplante en tezontle y en peat moss

Como testigo se hizo el trasplante de 30 plantas en tezontle y 30 plantas en

peat moss, (en ambos casos 10 plantas por repetición). Estas plantas fueron depositadas en los sustratos inoculados con *Fusarium oxysporum lycopersici*, las cuales de la misma forma que las anteriores tuvieron riegos con solución nutritiva y los mismos cuidados (luz, calefacción, ventilación, etc), además del mismo tiempo de exposición. Este último se planteó de un mes a 40 días debido a que en ese lapso de tiempo el hongo se manifiesta en la planta y entonces es posible analizar su comportamiento.



Figura 79. Testigo en tezontle y peat moss

Fertilización y aplicación se insecticidas. La solución nutritiva fue preparada bajo la siguiente dosis en macro y micronutrientes. Por cada 200 l de agua se agregaron: a) 40 g de superfosfato triple de calcio $(PO_4)_2H_4Ca$; b) 80 g de nitrato de calcio $(NO_3) Ca$, c) 40 g de nitrato de potasio NO_3K , d) 10 g de sulfato de potasio SO_4K ; e) 50 g de sulfato de magnesio SO_4Mg , f) 20 g de cloruro de potasio ClK .



Figuras 80. Fertilizantes utilizados y depósito para la solución nutritiva de 200l

Con respecto al control de plagas se aplicó únicamente un insecticida (confidor®) contra el ataque de la mosquita blanca.

Tutoreo de las plantas. Esta actividad consiste en ponerle un sostén a las plantas para el mejor manejo del cultivo y mayor aprovechamiento de los frutos. La colocación de los tutores se realiza inmediatamente después del trasplante. Las plantas se sostuvieron con hilo de nylon (rafia), junto con este tutoreo también se les hizo el deshije o “deschuponeo”. La rafia se colocó en todo el tallo de cada planta procurando no dañar las hojas. Al cumplir 40-50 días se llevó a cabo un conteo del total de plantas enfermas por tratamiento y por repetición y con ello encontrar el índice de incidencia en por ciento (%).



Figura 81. Acomodo y Tutoreo de las plantas

Material de apoyo:

Balanzas. Se utilizaron dos tipos de balanzas, una digital empleada en la medición de las cantidades pequeñas de PDA y muestras de sustrato, y una granataria empleada en la medición de la cantidad de sustrato utilizado.

Recipientes de 20 litros. Utilizados para depositar el sustrato durante la inoculación.

Hipoclorito de sodio diluido al 1.5 %. Este se utilizó para la desinfección del equipo de trabajo.

Charolas de poliestireno. Con 200 cavidades para la germinación de las semillas.

Charolas de poliestireno. Con 200 cavidades para la germinación de las semillas.

Macetas. Utilizadas para el trasplante del jitomate.

Semillas de jitomate. Variedad Rio Grande.

Charolas de poliestireno. Con 200 cavidades para la germinación de las semillas (Figuras 82, 83, 84 y 85).



Figura 82. Balanza Granataria



Figura 83. Balanza Digital



Figura 84. Recipientes de 20 l



Figura 85. Charolas utilizadas para la germinación de semillas

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

V.1 Propiedades térmicas de los suelos y sustratos agrícolas

En la Tabla 13 se presentan algunas propiedades físicas de los sustratos estudiados en el dispositivo experimental mostrado en las Figuras 44 a 46.

Tabla 13. Propiedades físicas de los sustratos estudiados en el dispositivo experimental

Material	NH	W (%)	HV (%)	DAPh (kg m ⁻³)	DAPs (kg m ⁻³)
Peat	1	59,64	7,17	191,41	119,63
	2	94,13	10,66	220,36	113,63
Moss	3	335,88	37,70	488,92	111,87
	1	0,61	0,66	1098,12	1091,34
Telzone rojo	2	8,10	8,74	1167,24	1079,55
	3	14,58	15,81	1243,45	1084,83

Donde: W- humedad gravimétrica; HV – humedad volumétrica; DAPh – densidad aparente en húmedo; DAPs – densidad aparente en base seca.

En el Tabla 14 se muestran los valores obtenidos del calor específico, la conductividad y difusividad térmica para los suelos estudiados

Tabla 14. Descripción estadística de las variables térmicas

	Telzone rojo		Peat Moss	
	Media	Desv. Típica	Media	Desv. típica
C _v (kJ·m ⁻³ ·°C ⁻¹) (método 1)	4104,93	1074,88	3408,07	1131,37
C _v (kJ·m ⁻³ ·°C ⁻¹) (método 2)	3730,14	391,64	3439,90	668,24
C _p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹) (método 1)	3,508	0,93	11,94	3,40
C _p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹) (método 2)	3,189	0,396	12,27	2,67
k (J m ⁻¹ °C ⁻¹ s ⁻¹) (método 1)	10,0	2,9	8,60	2,40
k (J m ⁻¹ °C ⁻¹ s ⁻¹) (método 2)	22,559	5,5	8,00	2,3
DT (m ² ·s ⁻¹) (método 1-1)	2,46E-6	2,95E-7	2,73E-6	4,19E-7
DT (m ² ·s ⁻¹) (método 2-2)	6,04E-6	1,17E-6	2,58E-6	8,09E-7

El **calor específico** (C_pTez) del telzone rojo resultó de 3,5083 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ con el primer método y 3,1898 kJ kg⁻¹ °C⁻¹ con el segundo método. Estos valores son un 63,08% y 57,34% mayores que los reportados por Rojo (2005) al estudiar las propiedades térmicas de un suelo manejado con labranza convencional con densidad aparente de 1,26 gcm⁻³, porosidad total de 52%, humedad gravimétrica a capacidad de campo de 19%, materia orgánica de 2,2 %; y cero labranza con densidad aparente de 1,37 gcm⁻³,

porosidad total de 48%, humedad gravimétrica a capacidad de campo de 21%, materia orgánica de 2,4%. Evidentemente las causas de estas diferencias se pueden encontrar en el efecto provocado por la labranza. En los experimentos se observó que cuando la densidad del telzone pasó de $1,020 \text{ gcm}^{-3}$ y $1,1580 \text{ gcm}^{-3}$ la capacidad calorífica aumentó ligeramente de $3,55 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ a $3,46 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Por otro lado (AAF 1988) menciona que en general el valor promedio del calor específico de los sólidos del suelo es de $0,71 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, el cual es menor en 5 veces que del valor obtenido en este trabajo. **Un mayor calor específico implica que para incrementar un grado centígrado el telzone rojo hay que aportar más energía lo cual influirá en el diseño y eficacia de un desinfectador por convección.**

La **conductividad térmica** (k_{Tez}) promedio en el telzone rojo resultó de $10 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Cuando la densidad es mayor se observó que la conductividad también aumentaba. Así con una densidad de $1,020 \text{ gcm}^{-3}$ se obtuvo un valor de $9,91 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, y con una densidad de $1,158 \text{ gcm}^{-3}$ se obtuvo un valor de $10,04 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Valores menores fueron reportados por Abu-Hamdeh y Reeder (2000), quienes al estudiar la conductividad térmica en un suelo franco arenoso con un contenido de humedad de 6,1% para densidades de $1,22 \text{ gcm}^{-3}$, $1,3 \text{ gcm}^{-3}$ y $1,425 \text{ gcm}^{-3}$ obtuvieron valores de k_s de $0,20 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $0,32 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $0,62 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ respectivamente y en un suelo franco arenoso con una densidad promedio de $1,32 \text{ gcm}^{-3}$ y un contenido de humedad gravimétrica promedio de 10,9 % obtuvieron un valor promedio de k de $0,52 \text{ J s}^{-1}\text{m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

La difusividad térmica se define como el cociente que resulta de dividir la conductividad térmica entre la capacidad calorífica volumétrica (ζ_{engel} y Boles, 2006; Nofziger, 2005). Los resultados de **difusividad térmica** (D_{TTez}) muestran que tuvo un valor promedio general de $2,457\text{E}-6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para el telzone rojo. Este valor es 59,32 % menor que los valores reportados por Nofziger (2005), quien al estudiar la variación de la temperatura del suelo con el tiempo y la profundidad en un suelo con un contenido de arcilla de 30% y una densidad de $1,2 \text{ gcm}^{-3}$ obtuvo un valor promedio de la difusividad térmica de $6,04\text{E}-6 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. D_{TTez} en el telzone rojo fue mayor en 6,42% cuando la densidad aparente promedio en base a masa seca fue de $1,020 \text{ g cm}^{-3}$ que cuando fue de $1,158 \text{ g cm}^{-3}$. D_{TTez} fue un 0,64% y un 21,50 % mayor cuando la humedad gravimétrica fue de 14,58 % que cuando la humedad fue 8,10% y 0,61 % respectivamente. Los valores obtenidos fueron menores a los de Nofziger (2005) quien obtuvo difusividades de $6,04\text{E}-6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $8,8\text{E}-6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para densidades de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ y $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente.

Para el sustrato peat moss los resultados muestran un **calor específico** (C_{p_m}) promedio de $11,94 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, significativamente mayor que en el telzone rojo. Este valor es un 85,92% mayor que el reportado por Burés (1997) de $1,68 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para un sustrato de turba. C_{p_m} fue mayor en 4,30% cuando la densidad aparente promedio con base a masa seca fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$ que cuando fue de $122,76 \text{ kg m}^{-3}$. C_{p_m} fue un 9,82% y un 23,56 % mayor cuando la humedad gravimétrica fue de 355,88 % que en las humedades de 94,13% y 59,64% respectivamente.

La **conductividad térmica** (k_m) promedio general del peat moss fue de $8.61 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, este valor es mayor que el valor de $5,44\text{E-}3 \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ reportado por Burés (1997). k fue un 6,62 % mayor cuando la densidad aparente promedio en base a masa seca fue de $122,75 \text{ kg m}^{-3}$ que cuando fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$.

Los resultados muestran que la **difusividad térmica** (D_{Tm}) del peat moss tuvo un valor promedio de $2.7326\text{E-}06 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Este valor es menor que el valor de $6,27\text{E-}5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ reportado por Burés (1997). D_{Tm} fue mayor en 4,21% cuando la densidad aparente promedio en base a masa seca fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$ que cuando fue de $122,75 \text{ kg m}^{-3}$.

Para determinar si existe influencia estadísticamente significativa de la humedad y el grado de compactación en las variables térmicas estudiadas se realizó un análisis de varianza donde el grado de compactación (GC) se evaluó a dos niveles y la humedad se probó a tres niveles de acuerdo a los valores mostrados en las Tablas 8 y 9. Como resultado de este análisis de varianza se muestran los intervalos Least Significant Difference (LSD) en las Figuras 86, 87 y 88. La superposición de los intervalos indica la no existencia de diferencias significativas a los niveles estudiados.

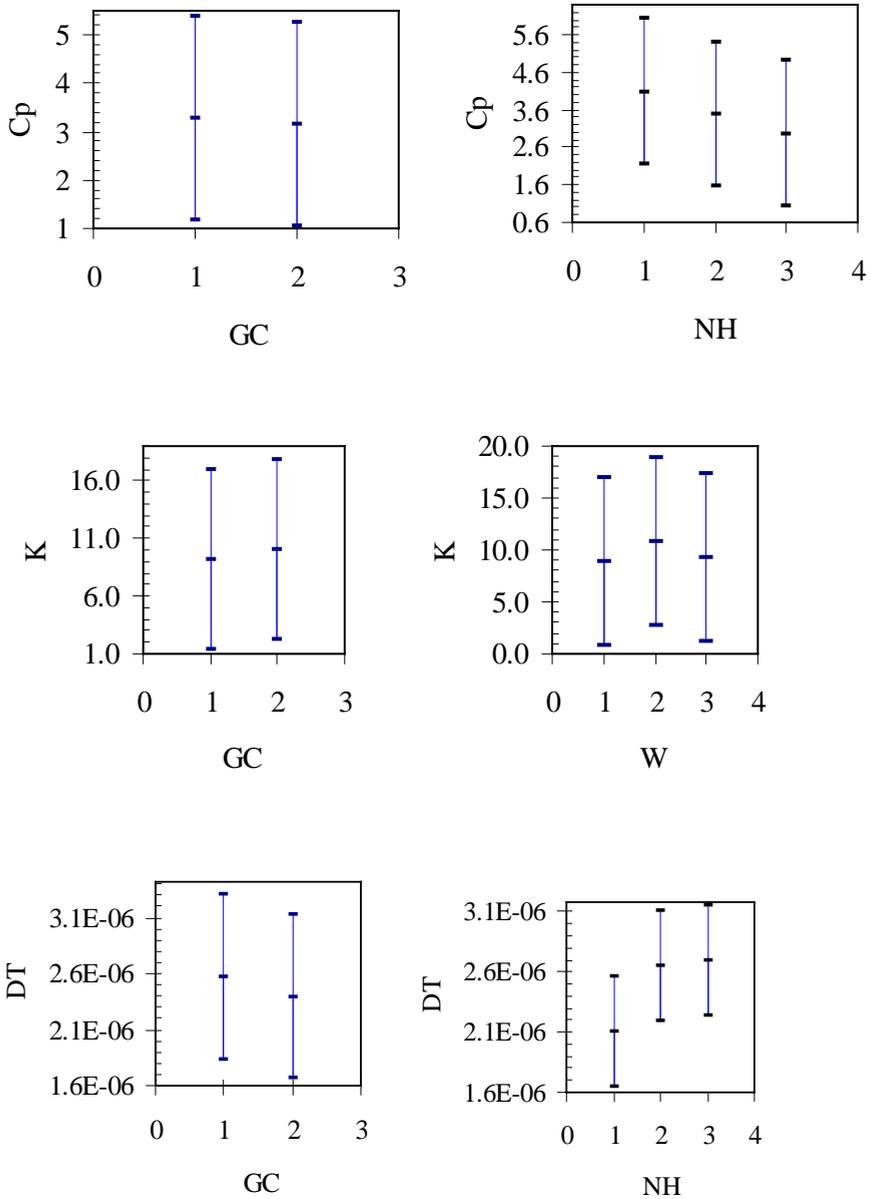


Figura 86. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Telzone Rojo

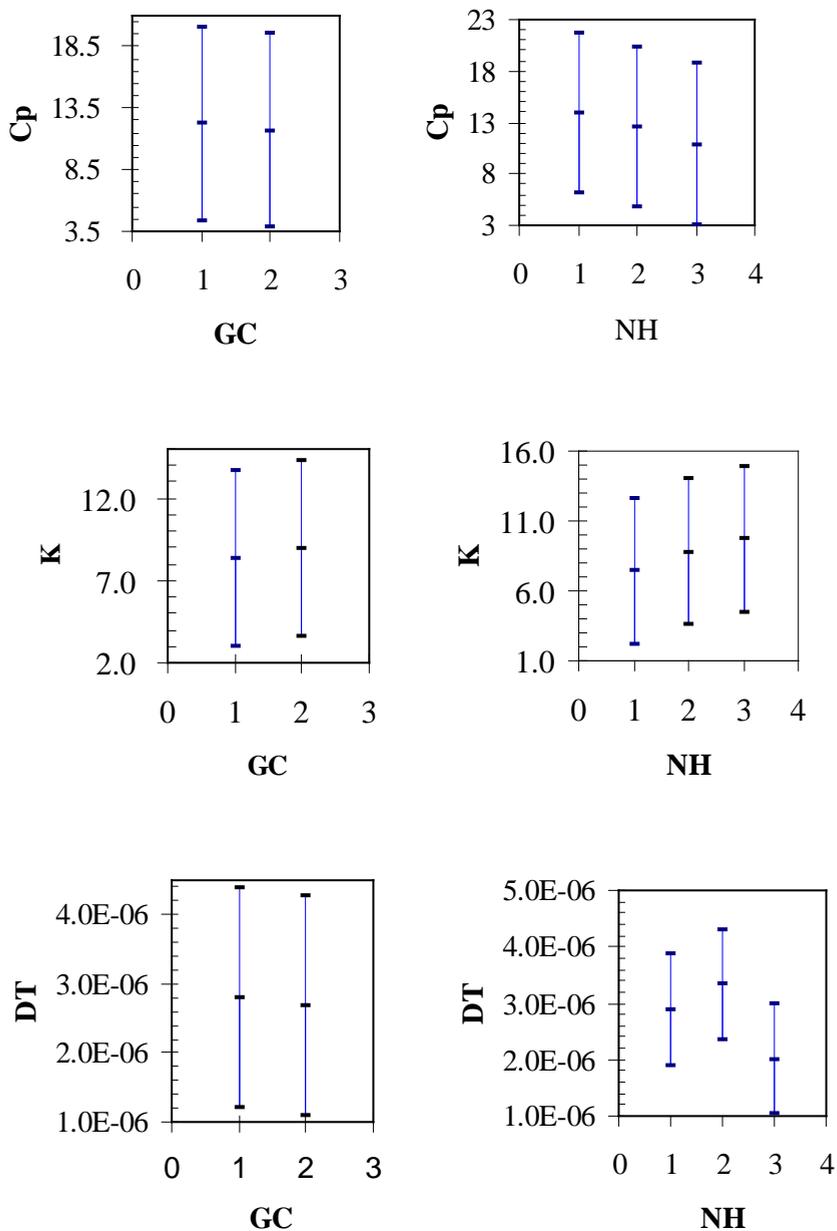
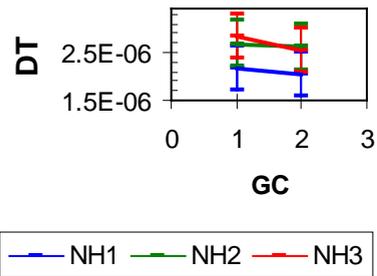
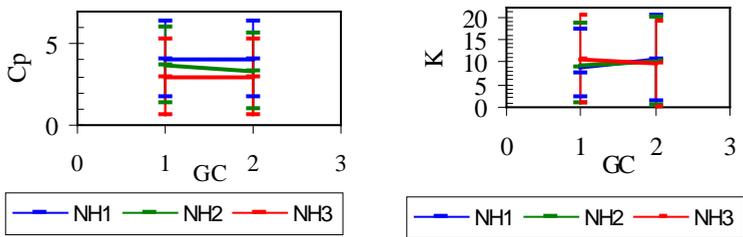
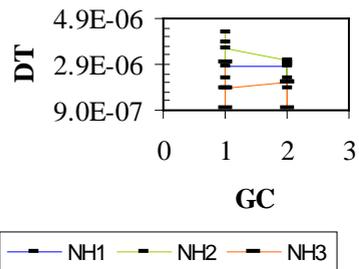
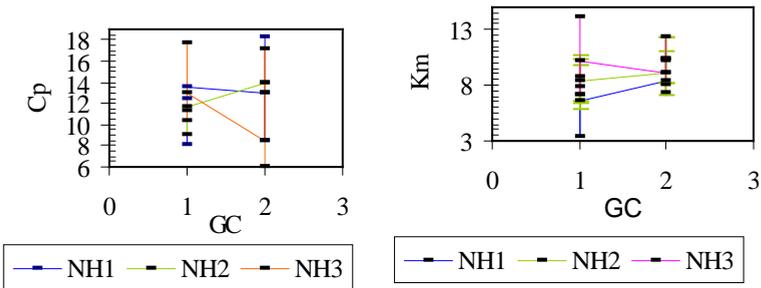


Figura 87. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Peat moss



(a)



(b)

Figura 88. Análisis de la interacción grado de compactación y humedad en el Telzone rojo (a) y peat moss (b), a través de los intervalos LSD a un nivel de confianza del 95%

En la Figura 89 se muestra la evolución de las temperaturas del suelo calentado y del agua transmisora de calor en función de la posición. El equilibrio térmico entre el agua y suelo se alcanzó cuando las temperaturas promedio de ambos fueron muy similares, a unos 668 minutos. Las ecuaciones que representan las curvas de las temperaturas promedio del agua y del suelo son:

Ecuación	R ²	C.V.
$T_{pa} = 63,360 \cdot e^{-0,0003969 \cdot t}$	0,9858	0,2296
$T_{ps} = 5,9661 + 8,3366 \cdot \ln t$	0,9254	4,4381

Donde: Tpa – temperatura promedio del agua, °C; Tps – temperatura promedio del suelo, °C.

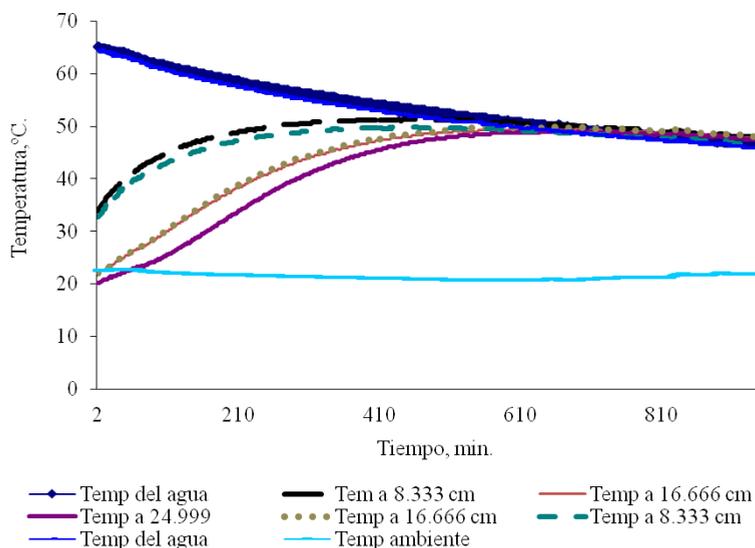


Figura 89. Variación de la temperatura en función del tiempo en distintos puntos del suelo calentado radialmente

En la Figura 90 se representa la variación de temperatura según el radio, es decir, la distancia de cada termopar a la superficie caliente en contacto con el caloportador (agua). Como se puede observar los dos extremos de la gráfica, que representan la temperatura del agua, van disminuyendo con el tiempo; mientras que la parte central va aumentando la temperatura.

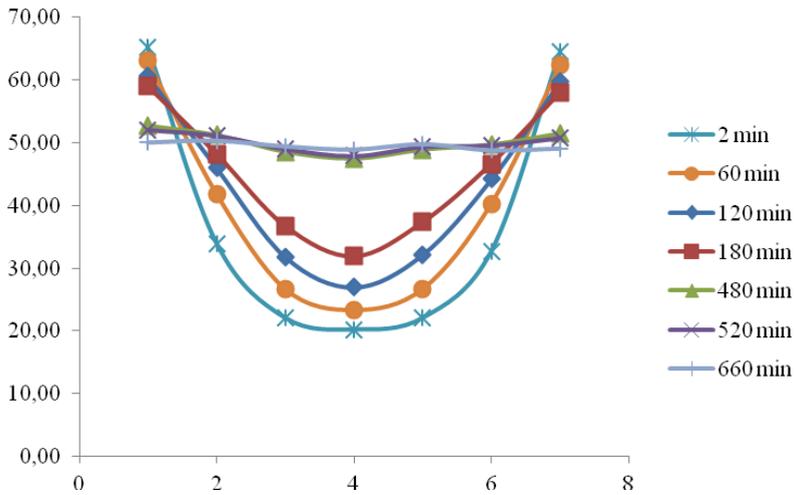


Figura 90. Variación de la temperatura en función del radio del suelo, calentado radialmente

Si observamos el perfil desde el extremo hasta el centro, observamos curvas exponenciales cambiantes con el tiempo, cuyas ecuaciones se muestran en la Figura 91.

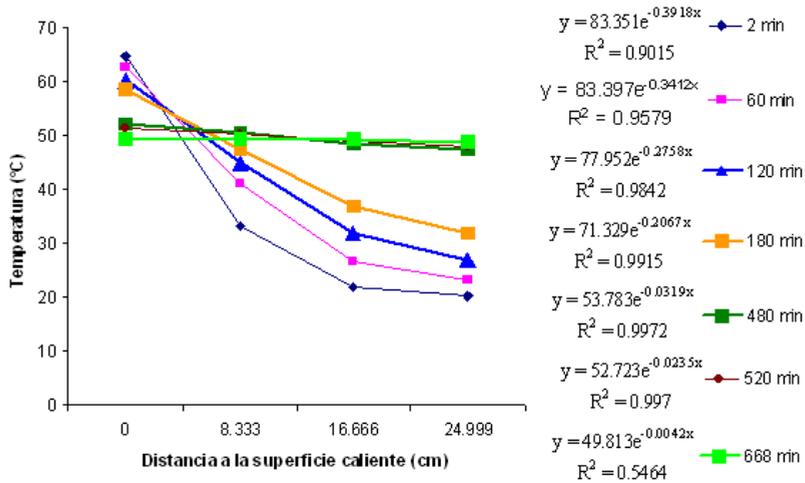


Figura 91. Variación de la temperatura en función del radio del suelo calentado radialmente

En el proceso estudiado no es aplicable el proceso de calentamiento modelizado por Newton en el que la velocidad de variación de

temperatura es proporcional a la diferencia entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío, tal como se muestran en la ecuaciones (35) a (38), dado que la temperatura del cuerpo caliente T_c no es constante, sino que se va enfriando.

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot (T_c - T(t)) \quad (35)$$

$$\int_{T_o}^{T(t)} \frac{dT}{T_c - T(t)} = \int_0^t a \cdot dt \quad (36)$$

$$\ln\left(\frac{T_c - T(t)}{T_c - T_o}\right) = -a \cdot t \quad (37)$$

$$T(t) = T_c - (T_c - T_o)e^{-a \cdot t} \quad (38)$$

En principio hay que suponer que el régimen de conducción no es estacionario. Tenemos la función $T = f(x, t)$, tal que $\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$. Basándonos en la ecuación de Fourier (ecuación diferencial del flujo de calor por conducción) la función $T = f(x, t)$ se debe estructurar como una función exponencial (Velázquez y Gracia, 2003), donde D_T : difusividad térmica del suelo (variación de temperatura debido al flujo de calor)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Para integrar la ecuación diferencial de Fourier utilizamos el método de separación de variables.

$$T(x, t) = f(x)g(t) \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = f(x)g'(t) \\ \frac{\partial T}{\partial z} = f'(x)g(t) \\ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = f''(x)g(t) \end{cases}$$

Entonces:

$$f(x) \cdot g'(t) = D_T f''(x)g(t)$$

$$\frac{1}{D_T} \frac{g'(t)}{g(t)} = \frac{f''(x)}{f(x)} = a$$

Al ser $g(t)$ sólo función de t , y $f(x)$ sólo de x , ambos miembros de la ecuación deben ser iguales a una constante a , obteniendo:

$$g'(t) - aD_T g(t) = 0$$

$$f''(x) - af(x) = 0$$

Integrando:

$$\frac{g'(t)}{g(t)} = aD_T \rightarrow \ln g(t) = (aD_T) \cdot t + cte$$

$$\boxed{g(t) = Ae^{aD_T t}}$$

La ecuación : $f''(x) - af(x) = 0$, es una ecuación de coeficientes constantes:

$$\lambda^2 - a = 0 \rightarrow \lambda = \pm\sqrt{a}$$

Por tanto: $f(x) = C_1 e^{x\sqrt{a}} + C_2 e^{-x\sqrt{a}}$

Con lo cual tenemos que:

$$T(x,t) = \left(C_1 e^{x\sqrt{a}} + C_2 e^{-x\sqrt{a}} \right) Ae^{aD_T t}$$

Para calcular las constantes se tienen en cuenta las condiciones de contorno:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_1 \rightarrow C_1 = 0$$

Quedando:

$$T(x, t) = K \cdot e^{D_T a t} \cdot e^{-x \sqrt{a}} \quad (39)$$

Esta fórmula demuestra que el incremento de la temperatura en un punto en función del tiempo debe ser exponencial. Sin embargo las curvas obtenidas en el dispositivo experimental discrepan parcialmente de la ecuación (39). Según esta ecuación la temperatura tendería a infinito cuando el tiempo aumenta, pero en el experimento la temperatura se estabiliza con el tiempo, como se comprueba en las Figuras 89, 90 y 91. Eso ocurre de ese modo porque la ecuación (39) supone un aporte de calor constante, cuando no lo es realmente. Velázquez y Gracia (2003), aplicaron exitosamente la ecuación (39) en el calentamiento del suelo irradiado superficialmente con microondas, cuando el aporte superficial de energía era constante, sin embargo en el dispositivo experimental la transferencia de calor $\frac{dQ}{dt}$ disminuye hasta que se hace cero.

En la Figura 91 se observa que el coeficiente de la función exponencial inicialmente aumenta de acuerdo a la ecuación (39), hasta un tiempo a partir del cual empieza a disminuir. La función que estudiaremos es la previa al cambio.

A pesar de variar la temperatura de forma exponencial se demuestra que la modelización lineal no presenta errores significativos, y facilita los cálculos. Si se modeliza el incremento de temperatura en función del tiempo como curvas rectas entre los tiempos 0 y 600 min, resultan las ecuaciones de la Tabla 15, las cuales poseen coeficientes de determinación bastante altos, mayores al 0,9. De estas ecuaciones podemos calcular la capacidad calorífica del suelo

Tabla 15. Ecuaciones lineales de la temperatura en función del tiempo

Ecuación	R ²	C.V.
$T_{agua} = 63,090149 - 0,022242 \cdot t$	0,97	1,20
$T_{24.999} = 23,142386 + 0,047392 \cdot t$	0,92	6,76

Por lo tanto:

$$\frac{dT_{suelo}}{dt} = 0,047392, \quad \frac{dT_{agua}}{dt} = 0,022242,$$
$$V_{suelo} = 49,08 \text{ litros}, \quad V_{agua} = 76,57 \text{ litros},$$

$$V_{suelo} \cdot C_{suelo} \cdot \frac{dT_{suelo}}{dt} = V_{agua} \cdot C_{agua} \cdot \frac{dT_{agua}}{dt}$$

$$C_{vsuelo} = 3,067 \text{ kJ/}^\circ\text{C} = 3069,66 \text{ kJ/m}^3\text{ }^\circ\text{C},$$

considerando una densidad DAh=1036,414 kg/m³

$$C_{psuelo} = 2,856 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$$

Este valor es tomado para un caso concreto. Tras sucesivas pruebas la media y desviación típica tanto para el suelo franco Telzone rojo como para el sustrato peat moss se muestran en la Tabla 14.

Para el cálculo del valor de la conductividad térmica, en el equilibrio térmico, se emplearon las ecuaciones (12) a (21). Considerando el comportamiento de la temperatura en función de la distancia radial $T_f(r)$, mostrado en la Figura 91, los modelos para estimar la temperatura se pueden agrupar en aquellos que la estiman en un intervalo de tiempo de 0 a 120 minutos y, los que la estiman en un intervalo de tiempo de 480 a 668 minutos (temperatura en las vecindades del equilibrio térmico) (Tabla 16). Esto puede ser debido a que el valor del calor transmitido por unidad de tiempo varía con el tiempo, y eso influye en el cálculo de la conductividad, tal que

$$k = \frac{dQ/dt}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{dT}{\ln(r)}} \quad (\text{método 1})$$

$$k = \frac{dQ/dt}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{dT}{dr}} \quad (\text{método 2})$$

Donde: r – distancia radial, cm; T – temperatura, °C; $\ln(r)$ – logaritmo natural de la distancia radial; $T(\ln(r))$ – temperatura como una función del logaritmo natural de la distancia radial; $dT/\ln(r)$ – derivada de la temperatura con respecto al logaritmo natural de la distancia radial; k - conductividad térmica dQ/dt - flujo de calor en el suelo.

También puede estar influenciado por la variación de agua en el suelo.

Tabla 16. Ecuaciones para estimar el valor de la conductividad térmica

Tiempo (min)	Tipo de modelo	Ecuación	R ²	C.V.
0-120	Exponencial	$T_{0-120} = 58,759 \cdot e^{-0,0406 \cdot r}$	0,91	3,1
0-120	Lineal logarítmica	$T_{0-120} = 73,916 - 8,8839 \cdot \ln r$	0,84	10,2
0-120	Lineal	$T_{0-120} = 58,011 - 1,575 \cdot r$	0,88	13,7
480-668	Exponencial	$T_{480-668} = 50,940e^{-0,001977 \cdot r}$	0,78	0,1
480-668	Lineal logarítmica	$T_{480-668} = 53,191 - 1,434 \cdot \ln r$	0,76	0,7
480-668	Lineal	$T_{480-668} = 50,916 - 0,097 \cdot r$	0,79	0,6

En ambos agrupamientos se estima bien la temperatura con cualquiera de los modelos. Se puede observar que la pendiente va cambiando con el tiempo.

Por ello para cada instante tendremos un valor distinto de $\frac{dT}{dt}$. Para el cálculo de la conductividad debe tomarse un valor medio, el cual podemos fijar como el obtenido en los 120 min, con un R² de 0,84.

El valor de la conductividad térmica se presenta en las Tabla 17.

Tabla 17. Conductividad térmica

Tiempo = 668 min Con base a la temperatura sensada por el termopar 4.			
C_p (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	dQ_s/dt	$dT/\ln(r)$	k (J s ⁻¹ m ⁻¹ °C ⁻¹)
3,40140	0,12346	8,88390	0,8847

Donde: C_p - calor específico del suelo, kJ kg⁻¹ °C⁻¹; dQ_s/dt - flujo de calor en el suelo, J s⁻¹; $dT/\ln(r)$ - razón de cambio de temperatura con respecto al logaritmo natural de la distancia radial, °C cm⁻¹; k - conductividad térmica, J m⁻¹ °C⁻¹ s⁻¹.

El valor de la conductividad ha sido calculado para un caso concreto. Tras sucesivas pruebas la media y desviación típica tanto para el suelo franco Telzone rojo como para el sustrato peat moss se muestran en la Tabla 14.

V.2 Diseño del intercambiador por convección.

a) Parámetros r y L.

Se realizó un análisis para la determinación de la longitud y el radio para el diseño del intercambiador de calor cilíndrico para desinfección en continuo de suelos y sustratos agrícolas. Para el análisis se tomaron como referencia las propiedades térmicas del Telzone Rojo y del Peat Moss previamente estudiadas. De estos se probaron las densidades y las humedades indicadas en las Tablas 8 y 9. Los valores medios y su dispersión se muestran en las Tablas 18 y 19.

Tabla 18. Radio y longitud del intercambiador de calor para la interacción GC*W

Telzone rojo								
Factor			C_v (KJ·m ⁻³ ·°C ⁻¹)		R (mm)		L (mm)	
GC	W	N	Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
1	1	3	4555,608	2203,055	62,73	5,71	2944,49	545,92
1	2	3	4036,763	306,286	70,36	0,94	2302,58	63,52
1	3	3	3157,586	290,063	72,30	3,05	2187,57	183,26
2	1	3	5007,296	923,894	61,06	1,90	3062,08	196,38
2	2	3	4120,303	428,430	69,30	0,60	2373,440	42,95
2	3	3	3752,023	929,339	68,43	0,60	2433,67	40,89

Sustrato Peat Moss								
Factor			C_v (kJ·m ⁻³ ·°C ⁻¹)		R (mm)		L (mm)	
GC	W	N	Media	D.E.	Media	D,E,	Media	D.E.
1	1	3	2216,886	878,13	72,9	5,62	2172,98	330,02
1	2	3	2353,740	438,78	81,9	6,15	1721,08	249,30
1	3	3	5472,733	2184,54	59,167	5,18	3307,30	547,01
2	1	3	2960,136	831,48	73,067	4,38	2153,24	249,87
2	2	3	2985,046	469,91	75,1	2,59	2030,61	142,70
2	3	3	4459,880	1015,84	62,267	8,28	3061,82	907,82

Tabla 19. Valores medios del radio y longitud

	Telzone Rojo		Peat Moss	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
L (mm)	2550,641	400,064	2409,577	714,792
R (mm)	67,367	4,805	70,721	9,277

El valor más bajo fue de 52,70 mm y se presentó para el peat moss cuando la densidad aparente en base seca fue de 122.75 kg.m^{-3} , la humedad gravimétrica de 335,88%. El valor más alto fue de 88,73 mm y se presentó para el peat moss cuando la densidad aparente en base seca fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$, la humedad gravimétrica de 94,13 %. La longitud del intercambiador (L) tomada para el diseño sería la media de 2500 mm. El valor más bajo fue de 1450,11 mm y se presentó para el peat moss cuando la densidad aparente con base seca fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$, la humedad gravimétrica de 94,135 %. El valor más alto fue de 3761,22 mm y se presentó cuando el grado de compactación en peat moss fue de $107,32 \text{ kg m}^{-3}$, la humedad gravimétrica de 335,88 %.

Los resultados mostraron que para el telzone rojo y el sustrato peat moss, conforme se incrementa el valor de la conductividad térmica se puede reducir el valor del radio del intercambiador de calor pero debe incrementarse el valor de la longitud.

Para estudiar si existen diferencias significativas en los niveles de compactación y humedad evaluados se realizó un análisis de varianza, del cual se muestran los intervalos LSD al 95% de nivel de confianza en las Figuras 92 y 93.

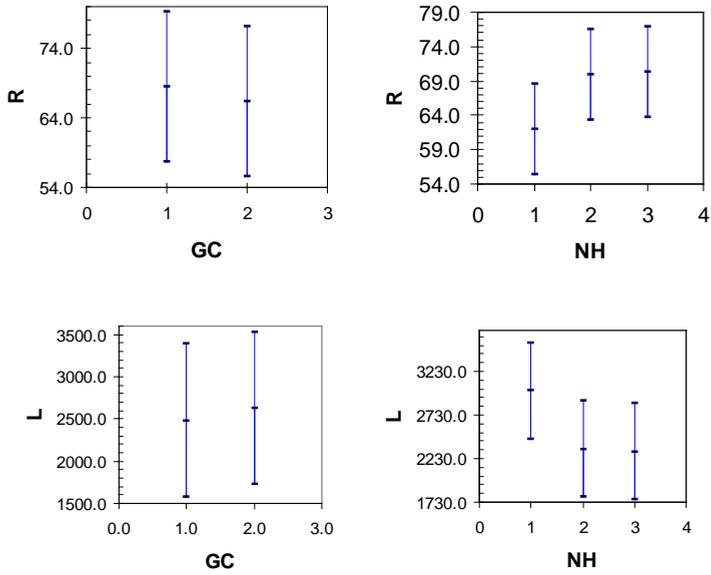


Figura 92. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Telzone Rojo

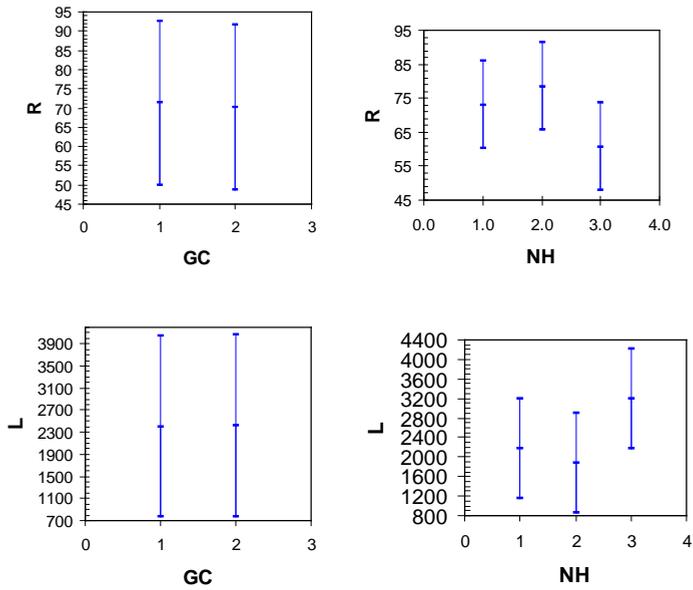


Figura 93. Intervalos LSD del análisis de varianza al 95% de confianza del factor grado de compactación y humedad en el Peat Moss

b) Cilindro exterior

El diámetro del cilindro concéntrico exterior se obtiene mediante la ecuación de continuidad, ecuaciones (40) y (41).

$$\dot{V}_{fc} = A_T \cdot V = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \cdot V \quad (40)$$

$$D_{ex} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{fc}}{\pi \cdot V} + D_{int}^2} \quad (41)$$

Donde: \dot{V}_{fc} - Flujo volumétrico del fluido caliente $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$; A_T - Área de la sección transversal del conducto anular, cm^2 ; V - velocidad del flujo del fluido caliente, cm s^{-1} ; D_{ext} - Diámetro del tubo concéntrico exterior, cm ; D_{int} - diámetro del tubo concéntrico interior, cm .

Considerando que los diámetros de los cilindros concéntricos exterior e interior forman un conducto anular entre ambos, entonces, el diámetro hidráulico del conducto anular depende del tipo y velocidad del fluido caliente, del tipo de suelo ó sustrato agrícola (considerados para calcular el diámetro del cilindro concéntrico interior), bajo estas consideraciones se procedió a calcular, el diámetro del cilindro concéntrico exterior con la ecuación 7, para agua caliente, vapor de agua y aire caliente con velocidades de flujo de 0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 m s^{-1} para los dos primeros fluidos y para aire caliente 11,27, 11,5 y 12 m s^{-1} . Resultando de media 13,92 cm , 13,88 cm y 13,86 cm respectivamente.

c) Fijación de la temperatura que es necesario alcanzar en la masa de suelo para hacer efectiva la desinfección y, tiempo que es necesario mantener esa temperatura

La temperatura que se debe alcanzar para el proceso de desinfección es de 71 °C y ésta se debe mantener por un periodo de tiempo, Δt , de 1800 segundos (Runia, 2003). Los datos anteriores fueron verificados por Chavez *et. al.*, (2005), y Chavez *et. al.*, (2008), por lo tanto, este tiempo es parte del tiempo que el suelo o sustrato debe permanecer en su recorrido por el intercambiador de calor.

d) Cálculo del calor necesario aportar al suelo o sustrato por unidad de tiempo para alcanzar esa temperatura y mantenerla el tiempo requerido

El tiempo para incrementar la temperatura del suelo o sustrato (t_r) dentro del intercambiador de calor desde la temperatura inicial (T_{i_suelo}) a la temperatura final (T_{f_suelo}) se estima en función del radio del cilindro (r_{int}), de la capacidad calorífica volumétrica del suelo o del sustrato (C_{VFF}), de la capacidad calorífica volumétrica del fluido caloportador (C_{VFC}), de la temperatura inicial ($T_{i_caloportador}$) y la final ($T_{f_caloportador}$) del fluido caloportador, del coeficiente de transferencia de calor (h_i) entre el fluido caloportador y el fluido frío, del flujo volumétrico del suelo (\dot{V}_{suelo}), del flujo volumétrico del fluido caloportador ($\dot{V}_{caloportador}$) y, de las revoluciones por segundo del tornillo sin fin del intercambiador de calor. Los parámetros antes mencionados se incluyen en las ecuaciones (42), (43) y (44)

$$\frac{dQ}{dt} = C_V \cdot \dot{V}_{suelo} \cdot (T_f - T_i) \quad (42)$$

Si t_r es el tiempo requerido para incrementar la temperatura del volumen de suelo o sustrato (generado por el paso y el área de la sección transversal) desde la temperatura inicial ($T_{inicialFF}$) hasta la temperatura final ($T_{finalFF}$), se tiene que la velocidad de avance del suelo viene dada por (43).

$$V_{prom} = rev \cdot \left(\frac{1}{t_r} \right) \cdot p \cdot \text{sen} \theta \quad (43)$$

Donde rev es velocidad de rotación del tornillo sin fin, rad/s; p el paso, θ inclinación del álabe. De las ecuaciones (44) y (45) se obtiene t_r

$$\frac{dQ}{dt} = \pi \cdot r_{int}^2 \cdot V_{prom} \cdot C_{VFF} \cdot (T_{f_suelo} - T_{i_suelo}) \quad (44)$$

$$\frac{dQ}{dt} = h_i \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_{suelo} - T_{caloportador}) \quad (45)$$

Donde: (dQ/dt) - es el flujo de calor en función del tiempo por grado centígrado de incremento de temperatura del fluido frío (suelo o sustrato), kJ

s^{-1} ; C_{VFF} - es el calor específico volumétrico del suelo o del sustrato, $kJ/m^3 \text{ } ^\circ C$;

El coeficiente de transferencia de calor, h_i , se calcula con la ecuación (46).

$$h_i = \frac{\dot{V}_{caloportador} \cdot C_{VFC} \cdot (T_{f_caloportador} - T_{i_caloportador})}{\pi \cdot d \cdot L \cdot (T_{suelo} - T_{caloportador})} \quad (46)$$

Así, considerando los valores de $r_{int} = 0,06$ m y $L = 3,17$ m, del primer experimento obtenidos con las propiedades térmicas de un suelo franco arenoso y los flujos y temperaturas de los fluidos frío y caloportador, $\dot{V}_{FF} = 0,0000193$ m^3/s , $C_{VFF} = 3906,55$ $kJ m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$, $C_{VFC} = 4075,09$ $kJ m^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$, $r_{int} = 0,060$ m, $L = 3,171169$ m, $T_{i\text{ suelo}} = 20^\circ C$, $T_{f\text{ suelo}} = 71^\circ C$, $T_{i\text{ caloportador}} = 85^\circ C$, $T_{f\text{ caloportador}} = 71^\circ C$, se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{caloportador} &= 0,000066031 m^3/s, & h_i &= 0,063015 kJ/s.m^2 \cdot ^\circ C, \\ h_i &= 0,07534 kJ/s \cdot ^\circ C & \dot{Q} &= 3,7671 kJ/s \end{aligned}$$

Se obtiene $t_r = 49,37 s^\circ C$ muy similar a 1 segundo por cada incremento de 1 grado centigrado.

Alcanzada la temperatura de desinfección ($71^\circ C$), ésta puede mantenerse considerando el valor de $h_i = 0,07534 kJ/s \cdot ^\circ C$.

e) Material aislante del intercambiador de calor.

La Figura 94 muestra el esquema de la circulación del suelo y fluido caloportador en el intercambiador.

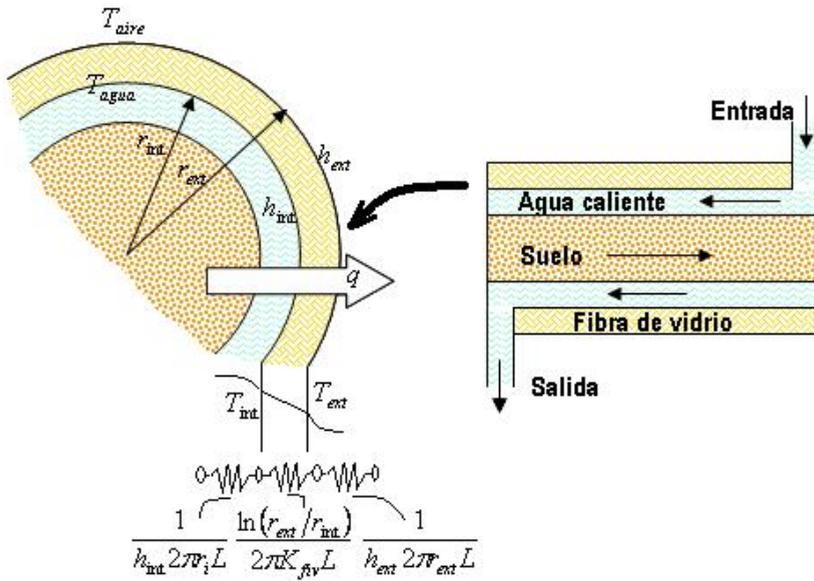


Figura 94. Distribución de temperaturas en el intercambiador de calor, donde T_{agua} - temperatura del agua caliente; T_{aire} - temperatura del espacio donde se encuentra el intercambiador de calor; r_{int} - radio del tubo concéntrico interior; r_{ext} - radio del tubo concéntrico exterior.

El flujo de calor a través de la lámina del cilindro concéntrico exterior hacia los alrededores se establece por medio de cuatro resistencias en serie y se da en la Figura 94. La conductividad térmica del material aislante fibra de vidrio es de $0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

A partir de flujo volumétrico del suelo (\dot{V}_{FF}), del fluido cloportador (\dot{V}_{FC}) y, los valores de los coeficientes de película entre el suelo y la pared interior del cilindro interior ($hi_{intccint}$) y entre el fluido caloportador y la pared exterior con aislante ($hi_{extccext}$). Por ejemplo, considerando que el fluido caloportador es agua caliente se obtuvieron los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{FF} &= 0,0000193 \text{ m}^3/\text{s}, & \dot{V}_{FC} &= 0,000066 \text{ m}^3/\text{s}, \\ hi_{intccint} &= 0,063015 \text{ kJ/s.m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}, & hi_{extccext} &= 0,07534 \text{ kJ/s.}^\circ\text{C}, \\ \dot{Q} &= 3,7671 \text{ kJ/s}. \end{aligned}$$

Considerando que $h_{i_{intccint}}$ es igual al coeficiente de película entre el fluido caloportador y la superficie interior del cilindro concéntrico exterior ($h_{i_{extccint}} = h_{i_{intccext}}$) se pueden calcular las resistencia que influyen en la transferencia de calor del fluido caloportador hacia los alrededores, adicionando el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de la superficie exterior del cilindro concéntrico exterior bajo la condición de convección natural.

Cálculo de h_{ext} (Coeficiente de película de la superficie exterior del cilindro concéntrico exterior), fluido caloportador agua caliente.

Datos: Convección natural:

$$T_{agua\ int\ cc\ ext} = 85^{\circ}C \quad T_{aire\ ext} = 25^{\circ}C \quad \rho_{aire} = 1,0755 \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{aire} = 0,02771 \frac{J}{s.m.^{\circ}C} \quad C_{P\ aire} = 1007 \frac{J}{kg^{\circ}C} \quad \mu_{aire} = 0,00001985 \frac{kg}{ms}$$

$$v_{aire} = 0,00001822 \frac{m^2}{s}$$

$$Re = \frac{V \cdot (Lc)}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot (Lc)}{\mu}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} = 0,7228$$

Número de Reynolds es despreciable, por lo tanto se tiene:

Número de Rayleigh

$$Ra = \left[\frac{(g)(\beta)(T_{sccext} - T_{aire})(D^3)}{\nu^2} \right] (Pr) = \frac{(9,80m/s^2)(0,0028)(85 - 25)(0,142)^3}{0,00001822^2} 1,097 = 15557723,08$$

Coeficiente de expansión volumétrica

$$\beta = \frac{1}{K} = \frac{1}{358} = 0,0028$$

Número de Pradtl

$$Pr = \frac{\left(0.00001985 \frac{kg}{ms}\right) \left(1007 \frac{J}{kg^{\circ}C}\right)}{0.01822 \frac{J}{s.m.^{\circ}C}} = 1,097088$$

Número de Nusselt $Nu = \frac{h \cdot (Lc)}{K}$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{(0,387)(Ra)^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 = 34,097945$$

$h_{extccext}$:

$$h_{extccext} = \frac{(34,097945) \left(0,02771 \frac{J}{s.m.^{\circ}C}\right)}{(0,142m - 0.1183)} = 39,867259 \frac{J}{s.m.^2.^{\circ}C}$$

Cálculo de las resistencias en la transferencia de calor:

$$R_1 = \frac{1}{(h_{intccext})(2)(\pi)(D_{intccext})(L)} \quad (47)$$

$$R_2 = \frac{\ln[(D_{extccext} - D_{extccint}) / (D_{intccext} - D_{extccint})]}{(2)(\pi)(K_{ainox})(L)} \quad (48)$$

$$R_3 = \frac{\ln(D_{fv} / D_{extccext})}{(2)(\pi)(K_{fv})(L)} \quad (49)$$

$$R_4 = \frac{1}{(h_{extccext})(2)(\pi)(D_{fv})(L)} \quad (50)$$

$$R_t = \frac{1}{(h_{int\ ccext})(2)(\pi)(D_{int\ ccext})(L)} + \frac{\ln[(D_{ext\ ccext} - D_{ext\ ccint})/D_{int\ ccext} - D_{ext\ ccint}]}{(2)(\pi)(K_{ainox})(L)} +$$

$$+ \frac{\ln(D_{fv}/D_{ext\ ccext})}{(2)(\pi)(K_{fv})(L)} + \frac{1}{(h_{ext})(2)(\pi)(D_{fv})(L)}$$

$$R_1 = \frac{1}{(75.34) \cdot 2\pi \cdot (0.14)(2.45)} = 0,00615884$$

$$R_2 = \frac{\ln[(0,142 - 0,1183)/(0,14 - 0,1183)]}{(2)(3,1416)(15)(2,45)} = 0,000381809$$

$$R_3 = \frac{\ln(D_{fv}/0,142)}{(2)(3,1416)(0,038)2,45} = 1,70950[\ln(D_{fv})] - 1,70950[\ln(0,142)]$$

$$R_3 = 1,70950[\ln(D_{fv})] + 3,320132$$

$$R_4 = \frac{1}{(34,097945) \cdot 2\pi \cdot (D_{fv})(2,45)} = 0,00190513 \left(\frac{1}{D_{fv}}\right)$$

$$R_t = 0,00615884 + 0,000381809 + 1,70950[\ln(D_{fv})]$$

$$+ 3,320132 + 0,00190513 \frac{1}{D_{fv}}$$

$$R_t = 3,326672 + 1,70950[\ln(D_{fv})] + 0,00190513 \frac{1}{D_{fv}}$$

Entonces la razón estacionaria de pérdida de calor está dada por la ecuación (51).

$$\dot{Q} = \frac{T_{scext} - T_{ambiente}}{3,326672 + (1,70950)\ln(D_{fv}) + 0,00190513 \frac{1}{D_{fv}}} \quad (51)$$

Según Çentel (2005), Fijando la temperatura de la superficie exterior de la fibra de vidrio en 40 °C, la razón de transferencia de calor de la superficie de la fibra de vidrio al medio ambiente está dada por la ecuación (52).

$$\dot{Q} = \frac{T_{fv} - T_{ambiente}}{R_4} = \frac{40^\circ C - 25^\circ C}{(0,00190513) \left(\frac{1}{D_{fv}} \right) \frac{^\circ C}{W}} \quad (52)$$

$$= (7873,47845) (D_{fv}) W$$

Al graficar la razón de transferencia de calor contra el diámetro de la fibra de vidrio se observa que con ambas ecuaciones ésta se hace constante cuando el diámetro de fibra de vidrio alcanza 200 mm (Figura 95).

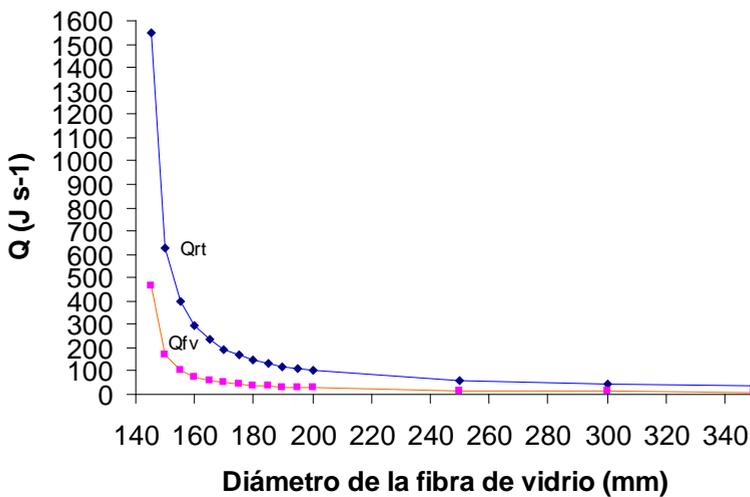


Figura 95. Razón de transferencia de calor contra el diámetro de la fibra de vidrio

Al expresar la razón de transferencia de calor en porcentaje para ese diámetro de la fibra de vidrio y considerando una razón de transferencia de calor, ya calculada, de $\dot{Q} = 3767,1 J/s$ se tiene:

Con la ecuación (58):

$$\dot{Q}_{porciento} = \left(\frac{102,588}{3767,1} \right) (100) = 2,72\%$$

Con la ecuación (59): $\dot{Q}_{porciento} = \left(\frac{25,9370}{3767,1} \right) \cdot 100 = 0,68\%$

Por lo tanto, la razón de transferencia de calor estará en el rango de 0,68 a 2,72 %, valores razonables, en la transferencia de calor con capa aislante.

c) Transportador de tornillo sin fin.

En la Tabla 20 se presenta la capacidad del transportador de tornillo sin fin.

Tabla 20. Capacidad del transportador de tornillo sin fin

Paso (mm)	Longitud (mm)	Rpm	C_{VT} (m³ s⁻¹)	C_{VR} (m³ s⁻¹)	E (%)
50,8	2000	1,270	8,710E-06	7,845E-06	90
50,8	2500	1,587	1,089E-05	9,807E-06	90
50,8	3000	1,905	1,307E-05	1,177E-05	90

Donde: C_{VT} - capacidad volumétrica teórica del transportador de tornillo sin fin; C_{VR} - capacidad volumétrica real del transportador de tornillo sin fin; E – eficiencia del transportador de tornillo sin fin; rpm – revoluciones por minuto del transportador de tornillo sin fin.

- Flecha del tornillo sin fin

La flecha del tornillo sin fin consiste de un tubo de acero inoxidable de, 12.7 mm de diámetro interior.

- Paso del tornillo sin fin.

El paso será igual a la mitad del diámetro del cilindro concéntrico interior, por lo tanto, su valor es 50.8 mm.

- Revoluciones por minuto del tornillo sin fin.

La velocidad rotacional del tornillo sin fin está dada por la ecuación (60). En la Tabla 60 se presentan las rpm para cada longitud del transportador de tornillo sin fin.

$$\eta = \frac{L/P}{t} \tag{53}$$

Donde: η - revoluciones de la flecha del tornillo sin fin, rpm; L – longitud del intercambiador, mm; P – paso del tornillo sin fin, mm; t – tiempo de transporte del suelo a través del tornillo sin fin, mín.

- **Capacidad teórica del transportador de tornillo sin fin (C_{VT}).**

Se calculó con las ecuaciones (53) y (54). En la Tabla 60 se presentan los valores de C_{VT} para cada longitud del transportador de tornillo sin fin.

- **Capacidad volumétrica real del transportador de tornillo sin fin.**

Debido a que los coeficientes para llenado del transportador de tornillo sin fin dados por Hendersson y Perry (1955), son muy bajos, en este estudio no se tomarán en cuenta ya que la velocidad del tornillo sin fin es muy baja, sin embargo se considera un llenado del 90 %. Por lo anterior la capacidad volumétrica real está dada por la ecuación (53). En la Tabla 60 se presentan los valores de C_{VR} para cada longitud del transportador de tornillo sin fin.

$$C_{VR} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ts}^2 - d_f^2) \cdot l_p \cdot n \cdot 0,9 \quad (54)$$

- **Eficiencia del transportador de tornillo sin fin (E).**

En este estudio se considera que el transportador de tornillo sin fin tiene una eficiencia de 90 %.

- **Potencia requerida por el transportador de tornillo sin fin.**

Se calculó con la ecuación (55). En la Tabla 21 se presentan los valores de la potencia total requerida, P_{TR} , potencia específica requerida, P_{ER} , y del torque, T, para cada longitud del transportador de tornillo sin fin.

Tabla 21. Potencia requerida por el transportador de tornillo sin fin

Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Potencia total requerida		Potencia específica requerida	Torque
		hp	W	W s kg ⁻¹ m ⁻¹	N-m
101,6	2000	1,585E-04	10,807	597,231	81,26
101,6	2500	2,476E-04	13,509	477,784	81,26
101,6	3000	3,566E-04	16,211	398,154	81,26

- Torque

Para una flecha rotando, la potencia total requerida, P_{TR} , es dependiente de la fuerza angular ó torque produciendo la rotación, y de la velocidad de rotación, ecuaciones (55) y (56) respectivamente.

$$P_{TR} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T \quad (55)$$

Despejando el torque se tiene:

$$T = \frac{P_{TR}}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (56)$$

Donde: P_{TR} - potencia total requerida, W; T - torque requerido, N-m; n - velocidad de rotación de la flecha, rps.

En las Figuras 96 a 99 se muestran los componentes y dimensiones del intercambiador de calor

a. Componentes.

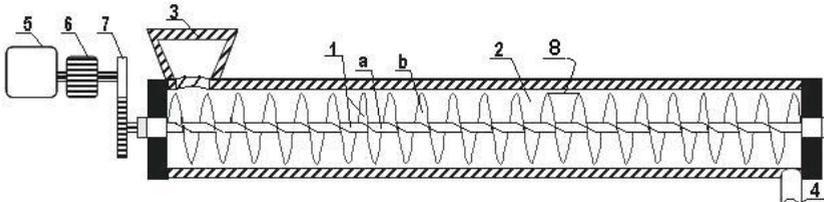


Figura 96. Componentes del transportador de tornillo sin fin

1. Elemento rotativo (tornillo sin fin).
 - a. Flecha.
 - b. Banda helicoidal radial.
2. Canal.
3. Tolva.
4. Salida del suelo o del estrato.
5. Motor eléctrico.
6. Reductor de velocidad.
7. Sistema de transmisión del movimiento por engranes.
8. Paso.

b. Dimensionamiento.

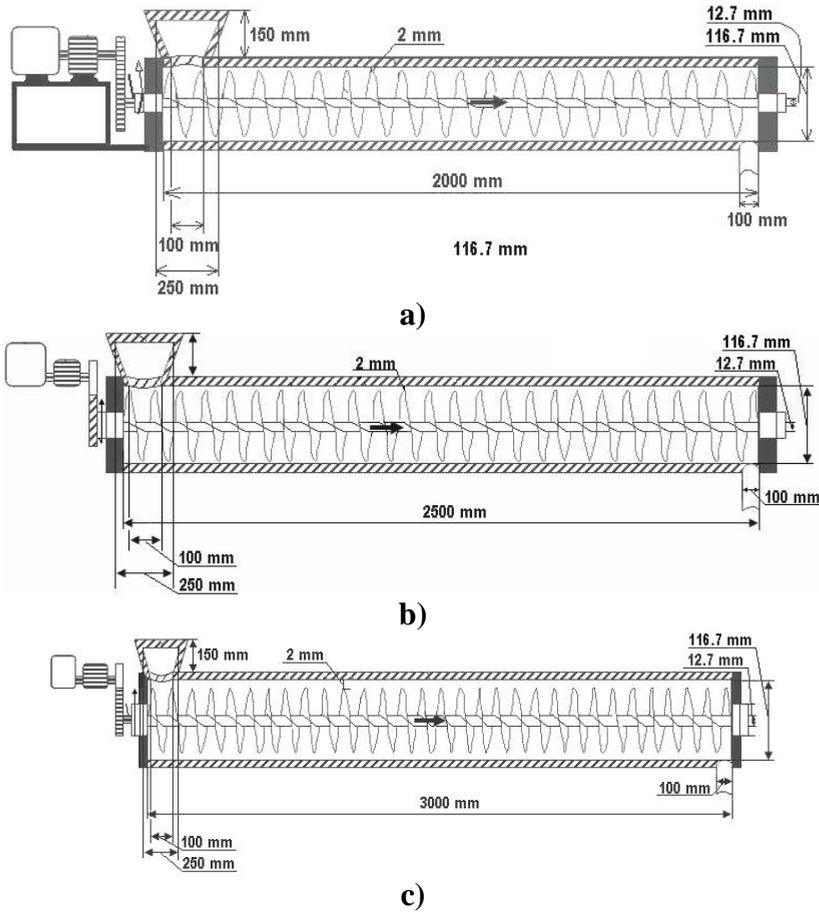


Figura 97 Dimensionamiento del transportador de tornillo sin fin

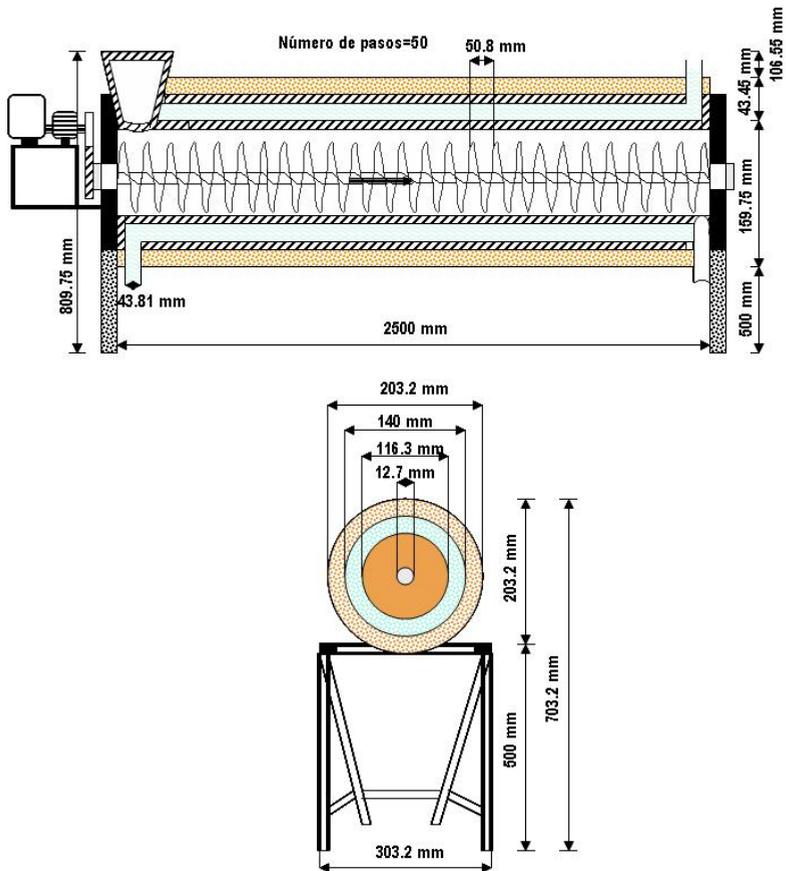


Figura 98. Dimensionamiento del intercambiador de calor de 2500 mm de longitud

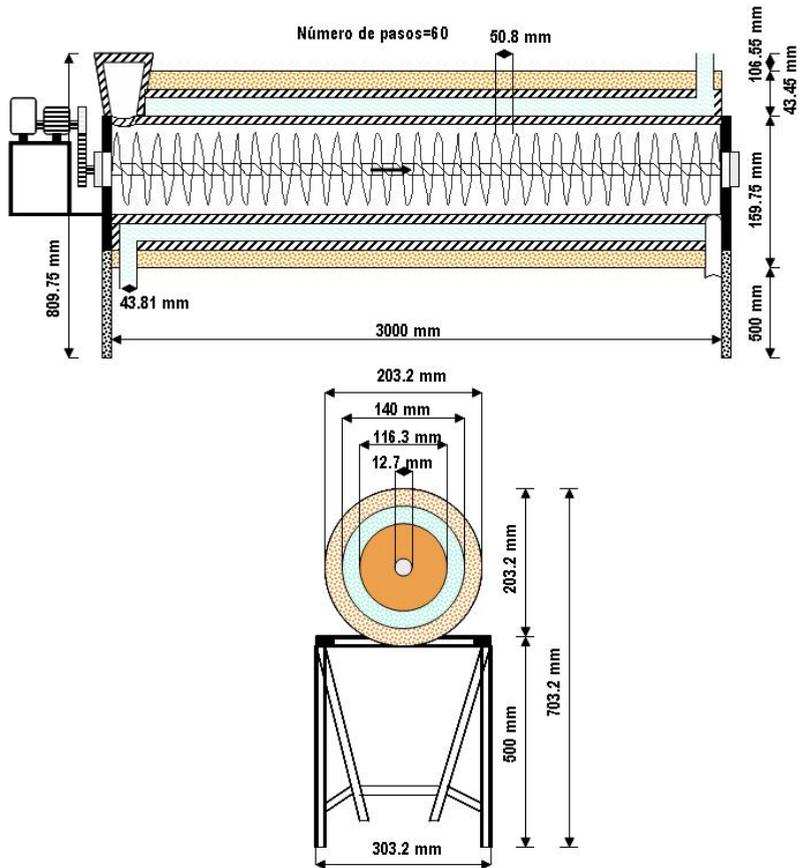


Figura 99. Dimensionamiento del intercambiador de calor de 3000 mm de longitud

V.3 Sistemas de aplicación de calor

En las Figura 100, 101 y 102 se muestra los sistemas de aplicación de agua caliente, vapor de agua y aire caliente respectivamente.

Fluido convector agua caliente

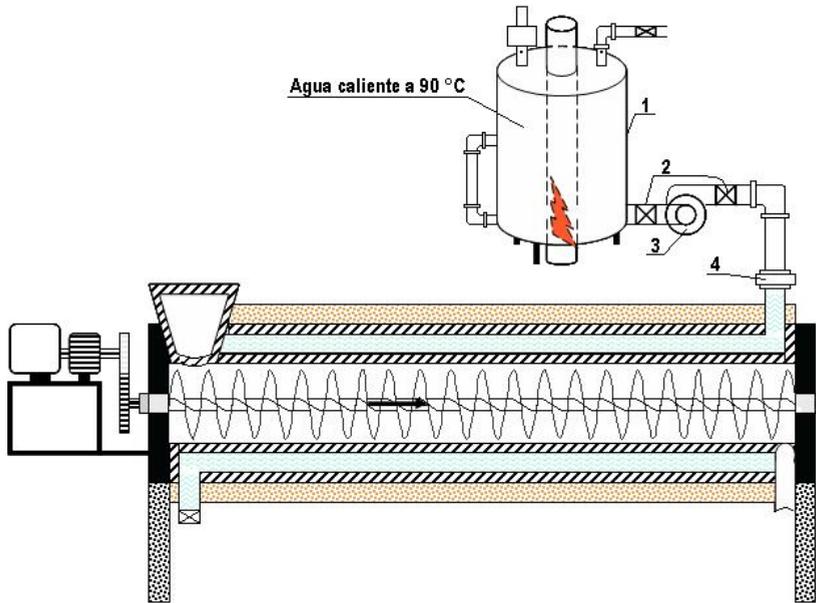


Figura 100. Sistema de aplicación de agua caliente
Donde: 1 – caldera; 2 – Válvulas tipo esfera; 3 – Bomba; 4 – Tuerca unión.

Fluido convector vapor de agua.

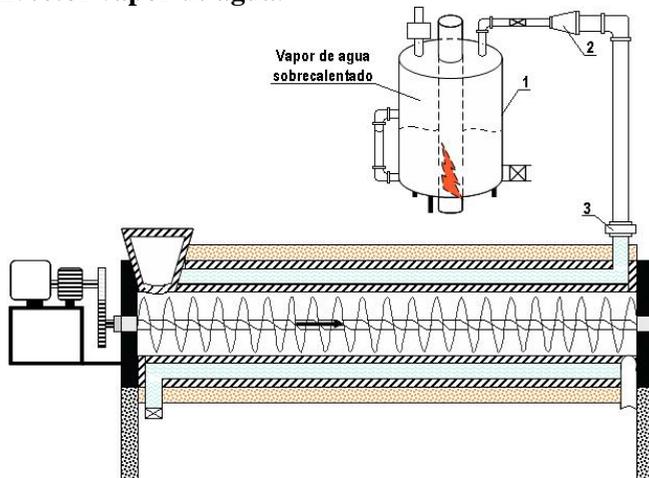


Figura 101. Sistema de aplicación vapor
Donde: 1 – caldera; 2 – Válvulas tipo esfera; 3 – Bomba; 4 – Tuerca unión.

Fluido convector aire caliente.

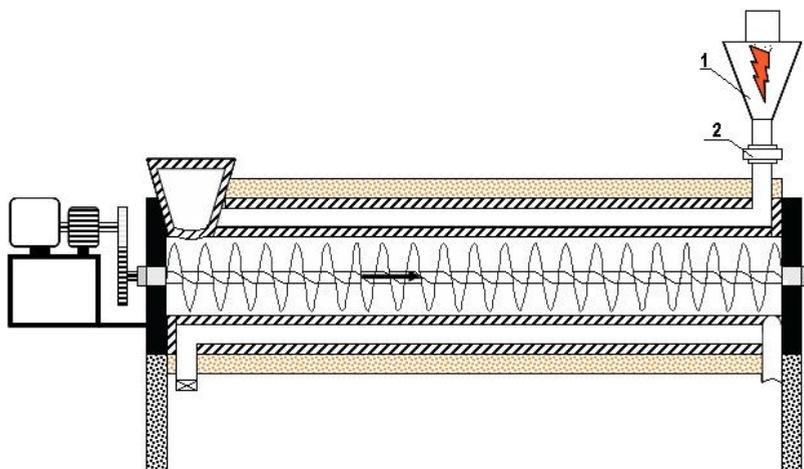


Figura 102. Sistema de aplicación aire caliente, donde: 1 – Quemador; 2 – Tuerca unión

V.4 Cálculo del coeficiente de película para distintas propiedades térmicas

Para el cálculo del coeficiente de película se utilizó el dispositivo descrito en los puntos 4.1 y 4.2. El calor cedido por el fluido convector utilizado (agua caliente, vapor de agua o aire caliente) se calcula a partir de la variación de temperatura experimentada en el intercambiador.

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \cdot C_{vf} \cdot (T_{ffinal} - T_{finicial}) \quad (57)$$

El calor cedido por el fluido es ganado por el suelo o sustrato agrícola.

$$\dot{Q}_s = h_i \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L \cdot (T_{chapa\ int} - T_{sustrato\ agrícola}) \quad (58)$$

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s \cdot C_{vs} \cdot (T_{sfinal} - T_{sinitial}) \quad (59)$$

Las temperaturas medias de entrada y salida de los materiales a calentar fueron de 21 °C y 71 °C respectivamente.

Se realizó un análisis de varianza para analizar la influencia de la humedad W sobre el flujo volumétrico (\dot{V}_V), calor cedido por el fluido caloportador

(agua caliente, vapor de agua y aire caliente) y ganado por el sustrato agrícola a desinfectar; el cual puede ser suelo franco arenoso, peat moss o tezontle rojo (Q) y, coeficiente de película entre la superficie de acero inoxidable y sustrato agrícola (hi). En las Tablas 24 y 25 se presentan las pruebas de Tukey para la fuente de variación humedad gravimétrica (W) sobre las variables termodinámicas analizadas cuando el fluido convector es aire caliente. En el anexo AI se dan las tablas de análisis de varianza.

Tabla 22. Pruebas de Tukey para la fuente de variación W sobre las variables termodinámicas h_{iTes} , h_m y Q_m

		Telzone rojo					Peat moss				
	W	h_{iTes} ($\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	N	Q_{Tez} (kJ s^{-1})	N	h_m ($\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	N	Q_m (kJ s^{-1})	N		
Agua caliente	1	0,0801 a	6	4,6108 ^a	6	0,051a	6	2,496 a	6		
	2	0,076 a	6	3,9330 ^a	6	0,056 ab	6	2,574 a	6		
	3	0,065 a	6	3,3315 ^a	6	0,080 b	6	4,789 b	6		
Vapor de	1	0,0801 a	6	4,6108 ^a	6	0,051 b	6	2,496 a	6		
	2	0,076 a	6	3,9330 ^a	6	0,056 ab	6	2,574 a	6		
	3	0,065 a	6	3,3315 ^a	6	0,080 a	6	4,789 b	6		
Aire caliente	1	0,0801 a	6	4,6108 ^a	6	0,051a	6	2,496 a	6		
	2	0,0766 a	6	3,9330 ^a	6	0,056 ab	6	2,574 a	6		
	3	0,0653 a	6	3,3315 ^a	6	0,080 b	6	4,789 b	6		

En la Tabla 22 se observa que en los sustratos agrícolas suelo franco arenoso y tezontle rojo las variables termodinámicas coeficiente de película y calor ganado por el sustrato incrementan su valor con forme se incrementa la humedad gravimétrica, en cambio en el sustrato peat mos decrece el valor de las variables termodinámicas conforme se incrementa la humedad gravimétrica.

Por otro lado, se observa que para un mismo sustrato agrícola las variables coeficiente de película y calor ganado permanecen constantes aún cuando el fluido caloportador es diferente, lo anterior se debe a la variación del flujo volumétrico del fluido caloportador de un sustrato a otro.

V.5 Evaluación del equipo de desinfección diseñado

En la Tabla 23 se presentan las condiciones del tezontle rojo y del sustrato peat moss utilizado para la calibración del intercambiador de calor.

Tabla 23. Propiedades de dos materiales a desinfectar bajo estudio

	Propiedad				
	HG (%)	HV (%)	DAPh (kg m ⁻³)	DAPs (kg m ⁻³)	Cv (kJ m ⁻³ °C ⁻¹ .)
Tezontle rojo	15,1	16,6	1098	931,323	4535,387
Peat moss	163,2	18,51	300,231	115,041	3515,818

Donde: HG – humedad gravimétrica; HV – humedad volumétrica; DAPh – densidad aparente en húmedo; DAPs – densidad aparente en seco; Cv – calor específico volumétrico.

Se probaron dos velocidades del tornillo sinfín (Tabla 27). La capacidad volumétrica (Qv) del intercambiador para desinfección en continuo depende del tiempo de desinfección, del suelo o del sustrato, que se fije. Aquí se fijan los tiempos de desinfección de 1500 y 1800 segundos realizando la prueba durante 14 minutos adicionales trabajando en continuo. La capacidad real de trabajo fue de 47, 67 y 31,32 l/h respectivamente (Tabla 26).

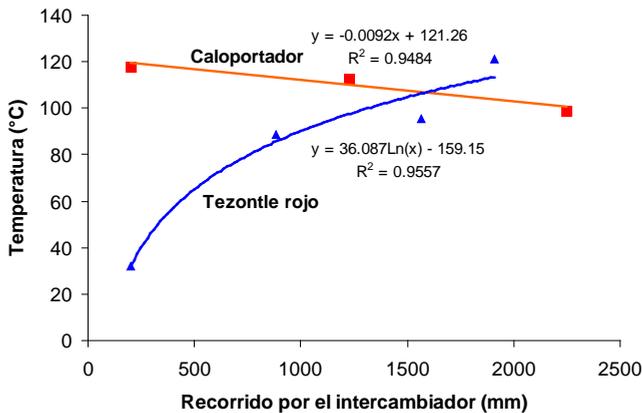
Tabla 24. Capacidad volumétrica del intercambiador

Velocidad de giro (rev/s)	Total de revoluciones	Tiempo de transporte ó de desinfección (s)	Capacidad real de trabajo (m ³ s ⁻¹)
3,215E-02	48,2283	1500	1,324E-05
2,116E-02	39,3700	1800	8,70E-06

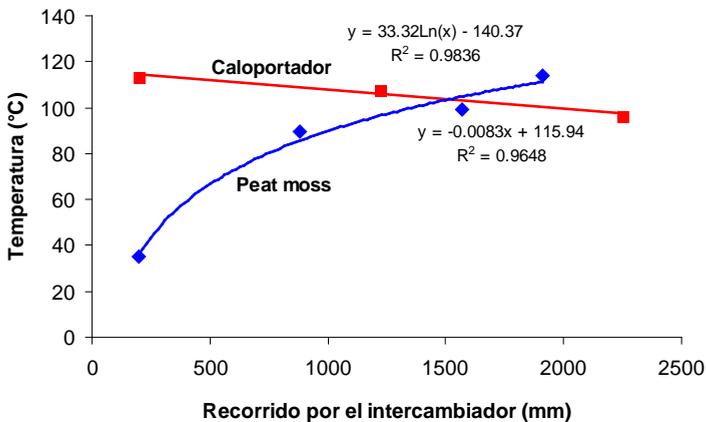
La Figura 103 muestra el comportamiento de la temperatura para el material a desinfectar (fluido frío) y el caloportador (fluido caliente) para una capacidad volumétrica de desinfección en continuo de 47,67 l/h. La curva azul representa las temperaturas medias sensadas por los termopares en contacto con el sustrato (Tezontle rojo o Peat moss) en su recorrido por el cilindro interior del intercambiador, y la curva roja corresponde a las temperaturas sensadas por los termopares en contacto con el fluido caloportador circulando por el espacio anular exterior del intercambiador. Se observa una caída leve de la temperatura del fluido caloportador entre la entrada y la salida del mismo, pero en el sustrato se experimenta un incremento importante de la temperatura. La temperatura alcanzada por el tezontle rojo (a) asciende a 120,5 °C, en el caso del sustrato peat moss a 118°C.

Para calcular el coeficiente global de transmisión de calor en el intercambiador, junto el calor cedido por el aire caliente (Q_{aic}) y el calor ganado por el material a desinfectar (Q_{Tez}) se fijó una productividad de 31,38 litros h^{-1} y 47,671 litros h^{-1} , y se empearon las ecuaciones (28) a (34), (51) a (58).

Para calcular las variables termodinámicas h_i , Q_{aic} , y Q_{Tez} se utilizaron cuatro procedimientos. Para procesar los datos en cada procedimiento se utilizó el paquete computacional SAS (Statistical Anlysis System).



(a)



(b)

Figura 103. Variación de temperatura del sustrato y caloportador en función de su recorrido dentro del intercambiador: (a) tezontle rojo, (b) sustrato peat moss

Procedimiento 1 En cada punto del intercambiador donde se sensaron las temperaturas:

$$\Delta T = T1 - T2$$

Donde: T1 – temperatura del fluido caliente y T2 – temperatura del fluido frío.

Con este procedimiento se obtuvieron valores para las tres variables termodinámicas mencionadas anteriormente. El programa utilizado se muestra a continuación:

```
Data PRO;
Input t TemAmb Taic1 DAP1 Cp1 TTez2 DAP2 Cp2 TTez3 DAP3 Cp3
Taic4 DAP4 Cp4 TTez5 DAP5 Cp5 TTez6 DAP6 Cp6 Taic7 DAP7 Cp7;
hi=((0.000603*(DAP1*Cp1)*(Taic1-
TemAmb))/(3.1416*0.1163*2.45*(Taic1-TemAmb)))*1000;
Q_Tez=(hi*3.1416*0.1163*2.45)*(Taic1-TemAmb);
Q_aic=(0.000603*(DAP1*Cp1)*(Taic1-TemAmb))*(-1)*1000;
cards;
.
.
.
Proc Print;
Var hi Q_Tez Q_aic;
Proc means;
Var hi Q_Tez Q_aic TemAmb;
run;
```

Procedimiento 2. Con las ecuaciones de las medias aritméticas entre las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos:

$$T1_{media} = \frac{T1_1 + T1_2}{2} \text{ y } T2_{media} = \frac{T2_1 + T2_2}{2}$$

Donde: T1_{media} – temperatura media del fluido caliente, °C; T2_{media} – temperatura media del fluido frío, °C; T1₁ – temperatura de entrada del fluido caliente, °C; T1₂ – temperatura de salida del fluido caliente, °C; T2₁ – temperatura de entrada del fluido frío, °C; T2₂ – temperatura de salida del fluido frío, °C.

El programa utilizado se muestra a continuación:

```

Data PRO;
Input t TemAmb Taic1 DAP1 Cp1 TTez2 DAP2 Cp2 TTez3 DAP3 Cp3
Taic4 DAP4 Cp4 TTez5 DAP5 Cp5 TTez6 DAP6 Cp6 Taic7 DAP7 Cp7;
hi=((0.000603*((DAP7*Cp7+DAP1*Cp1)/2)*(((Taic7+Taic1)/2)-
((TemAmb+TTez6)/2)))/(3.1416*0.1016*2.45*(((Taic7+Taic1)/2)-
((TemAmb+TTez6)/2))))*1000;
QTes=(hi*3.1416*0.1016*2.45)*(((Taic7+Taic1)/2)-((TemAmb+TTez6)/2));
Qaic=(0.000603*((DAP7*Cp7+DAP1*Cp1)/2)*(((Taic7+Taic1)/2)-
((TemAmb+TTez6)/2)))*(-1)*1000;
cards;
.
.
Proc Print;
Var hi QTes Qaic;
Proc means;
Var hi QTes Qaic;
run;

```

Procedimiento 3 Con las ecuaciones para temperatura que corresponden al salto medio aritmético:

$$\Delta T_{Global} = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_1}{2}$$

Donde: $\Delta t_1 = T_{11} - T_{22}$ y $\Delta t_2 = T_{12} - T_{21}$

Con este procedimiento se obtiene hi_{Global} . El programa utilizado se muestra a continuación.

```

Data PRO;
Input t TemAmb Taic1 DAP1 Cp1 TTez2 DAP2 Cp2 TTez3 DAP3 Cp3
Taic4 DAP4 Cp4 TTez5 DAP5 Cp5 TTez6 DAP6 Cp6 Taic7 DAP7 Cp7;
hi=((0.000603*((DAP1*Cp1+DAP4*Cp4)/2)*(((Taic1+Taic4)/2)-
((TemAmb+TTez3)/2)))/(3.1416*0.1016*2.45*(((Taic1+Taic4)/2)-
((TemAmb+TTez3)/2))))*1000;
QT=(hi*3.1416*0.1016*2.45)*(((Taic1+Taic4)/2)-((TemAmb+TTez3)/2));
Qaic=(0.000603*((DAP1*Cp1+DAP4*Cp4)/2)*(((Taic1+Taic4)/2)-
((TemAmb+TTez3)/2)))*(-1)*1000;
cards;
.
.

```

```

.
Proc Print;
Var hi QTez Qaic;
Proc means;
Var hi QTez Qaic;
run;

```

Procedimiento 4. Con las ecuaciones para temperatura que corresponden al salto medio logarítmico:

$$\Delta T_{Global} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

Con este procedimiento se obtiene hi_{Global} . El programa utilizado se muestra a continuación.

```

Data PRO;
Input t TemAmb Taic1 DAP1 Cp1 TTez2 TTez3 Taic4 DAP4 Cp4 TTez5
TTez6 Taic7 DAP7 Cp7;
hi=(((0.000603*((DAP7*Cp7+DAP1*Cp1)/2))*(((Taic1-TemAmb)-(Taic7-
TTez6)))/(log((Taic1-TemAmb)/(Taic7-
TTez6)))))/(3.1416*0.1163*2.45*(((Taic1-TemAmb)-(Taic7-
TTez6))/(ln((Taic1-TemAmb)/(Taic7-TTez6)))))*1000;
QTez=(hi*3.1416*0.1163*2.45)*(((Taic1-TemAmb)-(Taic7-
TTez6))/(ln((Taic1-TemAmb)/(Taic7-TTez6))));
Qaic(((0.000603*((DAP7*Cp7+DAP1*Cp1)/2))*(((Taic1-TemAmb)-
(Taic7-TTez6))/(ln((Taic1-TemAmb)/(Taic7-TTez6))))*(-1))*1000;
cards;
.
.
Proc Print;
Var hi QTez Qaic;
Proc means;
Var hi QTez Qaic;
run;

```

Para los flujos volumétricos de $6,03 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $8,70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de los fluidos caloportador (\dot{V}_{aic}) y tezontle rojo \dot{V}_{Tez} respectivamente, se observa en la Tabla 25 que, los valores de hi , Q_{aic} Q_{Tez} medios durante la calibración.

Tabla 25. Medidas de coeficiente de transmisión global de calor para tezontle rojo

	Variable	N	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
Procedimiento 1 (Tezontle rojo)	hi (J/s.m ² °C)	59	0,777	0,039	0,656	0,844
	Q _{Tez} (J/s)	59	9,684	10,664	43,957	-7,251
	Q _{aic} (J/s)	59	-9,684	10,664	7,251	-43,957
Procedimiento 2 (Tezontle rojo)	hi (J/s.m ² °C)	59	0,808	0,020	0,764	0,841
	Q _{Tez} (J/s)	59	6,276	4,902	0,695	22,982
	Q _{aic} (J/s)	59	-6,276	4,902	-0,695	-22,982
Procedimiento 3 (Tezontle rojo)	hi (J/s.m ² °C)	59	0,706	0,017	0,668	0,734
	Q _{Tez} (J/s)	59	6,276	4,902	0,695	22,982
	Q _{aic} (J/s)	59	-6,276	4,902	-0,695	-22,982
Procedimiento 3 (Tezontle rojo)	hi (J/s.m ² °C)	59	0,615	0,036	0,554	0,667
	Q _{Tez} (J/s)	59	7,253	3,744	0,457	15,829
	Q _{aic} (J/s)	59	-7,253	3,744	-15,829	-0,457
Peat moss	hi (J/s.m ² °C)	93	0,64	0,01	0,620	0,66
	Q _{pm} (J/s)	93	36,74	8,35	18,19	56,52
	Q _{aic} (J/s)	93	-36,74	8,35	-18,19	-56,52

En la Figura 104 se muestra la variación del coeficiente de transmisión global en el intercambiador de calor en función del recorrido del tezontle rojo. Se observa una tendencia a estabilizarse alrededor del valor 0,62 J s⁻¹ m⁻² °C⁻¹.

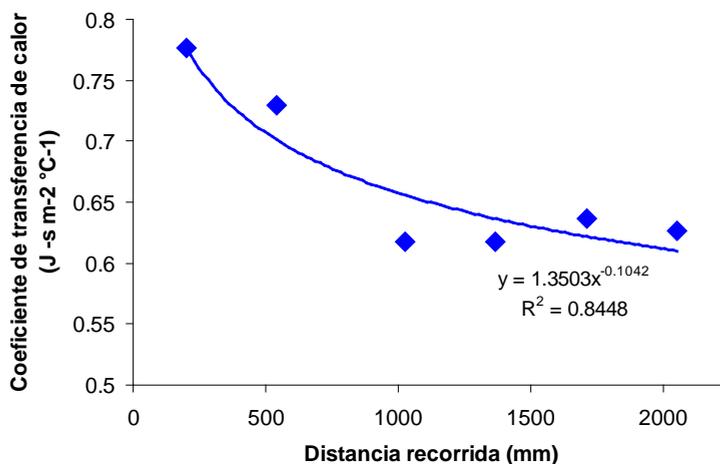


Figura 104. Variación del coeficiente de transmisión de calor en el recorrido del suelo por el intercambiador

V.6 Desinfección del hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* (UFC/g_{Sustrato}).

V.6.1 Presencia de Unidades Formadoras de colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* en telzone rojo tras cada tratamiento (UFC/g_{Tez})

En la Tabla 26 se presenta las Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* presentes en telzone rojo tras cada tratamiento (Tabla 12) y, en la Tabla 27 se muestran las Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* presentes en el testigo. Los tratamientos 1 y 2 consistieron en aplicación de calor durante 25 minutos, cada uno a un rango de humedad (15,67 % en T1 y 12,32 % en T2). En los tratamientos 3 y 4 el tiempo de aplicación fue de 30 minutos con humedad de 14,41 % en T3 y 11,23 % en T4.

Tabla 26. Unidades formadoras de colonias presentes después de la aplicación de tratamientos en Telzone rojo

N	T	R	UFC/g _{Tez}	N	T	R	UFC/g _{Tez}	N	T	R	UFC/g _{Tez}
1	1	1	0	17	2	2	0	33	3	3	0
2	1	1	0	18	2	2	0	34	3	3	0
3	1	1	0	19	2	2	0	35	3	3	9
4	1	1	9	20	2	2	0	36	3	3	0
5	1	2	0	21	2	3	0	37	4	1	0
6	1	2	0	22	2	3	9	38	4	1	18
7	1	2	0	23	2	3	9	39	4	1	0
8	1	2	0	24	2	3	0	40	4	1	0
9	1	3	0	25	3	1	0	41	4	2	0
10	1	3	0	26	3	1	0	42	4	2	0
11	1	3	18	27	3	1	18	43	4	2	0
12	1	3	0	28	3	1	0	44	4	2	0
13	2	1	0	29	3	2	0	45	4	3	0
14	2	1	0	30	3	2	0	46	4	3	0
15	2	1	0	31	3	2	0	47	4	3	0
16	2	1	0	32	3	2	0	48	4	3	0

Donde: N - número de observación; T - tratamiento UFC/g_{Tez} – unidades de *Fusarium oxysporum lycopersici* por gramo de telzone.

Se observa en la Tabla 26 que la presencia de UFC/g_{Tez} tendió a ser nula para cada tratamiento. La presencia de 9 ó 18 UFC/g_{Tez} por tratamiento se debe a la contaminación producida durante el manejo de las muestras y no a una ineficiencia del tratamiento de calor con aire caliente.

Tabla 27. Unidades formadoras de colonias (UFC/g_{Tez}) presentes en el testigo

Testigo									
		Media			Media			Media	
R	SR	(UFC/g _{Tez})	R	SR	(UFC/g _{Tez})	R	SR	(UFC/g _{Tez})	
1	1	630	2	1	909	3	1	774	
1	2	702	2	2	1026	3	2	792	
1	3	675	2	3	1080	3	3	738	
1	4	675	2	4	1107	3	4	729	

En la Tabla 28 se presenta el análisis de varianza para las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{Tez}) del hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* en telzone rojo, donde se observa que no hay diferencias significativas entre los tratamientos.

Tabla 28. Análisis de varianza para fuentes de variación sobre las UFC/g_{Tez} en telzone rojo

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	11	195,75	17,795	0,69	0,740
Error	37	931,50	25,875		
Total	47	1127,25			
corregido					
R ² = 0,173	CV=271,29	D.E=0,50	\bar{X} =1,875		
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
T	3	6,750	2,250	0,09	0,966
R	2	84,375	42,187	1,63	0,210
T*R	6	104,625	17,437	0,67	0,671

Donde: F de V - fuente de variación; G.L. - grados de libertad; S.C.: - suma de cuadrados; C.M. - cuadrados medios; Fo - F calculada; Pr>F - probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; T – tratamiento; R - repetición.

En la Tabla 29 se presentan las pruebas de Tukey de los tratamientos sobre la variable Unidades formadoras de Colonias (UFC/g_{Tez}) de *Fusarium oxysporum lycopersici* en Telzone rojo

Tabla 29. Pruebas de Tukey para estudiar la diferencias entre tratamientos sobre la variable (UFC/g_{Tez}) en telzone rojo

Unidades de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> (UFC/g _{Tez})			
F de V	Nivel	N	\bar{X} (UFC/g _{Tez})
T	1	12	2,250 a
	3	12	2,250 a
	2	12	1,500 a
	4	12	1,500 a
		DMS_{0,05}	5,5929
R	1	16	2,813 a
	3	16	2,813 a
	2	16	0,0000a
		DMS_{0,05}	4,3959

Donde: DMS₀₅ - diferencia mínima significativa; \bar{X} - media; F de V - fuente de variación; N - número de observaciones.

Las UFC/g_{Tez} tuvieron un valor promedio general de 1,875. Fueron mayores en los tratamientos 1 y 3 en 33,33 % que en los tratamientos 2 y 4, resultando igual su valor entre los tratamientos 1 y 3, y entre los tratamientos 2 y 4 (Tabla 29). Su valor fue igual en las repeticiones 1 y 3 y, fueron nulas en la repetición 2.

En la Tabla 30 se presenta los análisis de varianza para las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{Tez}) del testigo del hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* en telzone.

Tabla 30. Análisis de varianza para evaluar las diferencias entre los tratamientos y el testigo sobre la variable UFC/g_{Tez} en telzone rojo

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	2	281893,50	140946,75	44,65	<,0001
Error	9	28410,75	3156,75		
Total corregido	11	310304,25			
R2= 0,9084	C.V.= 6,85	D.E=56,18	\bar{X} =819,7		
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
R	2	281893,5	140946,75	44,65	<,0001

Donde: F de V - fuente de variación; G.L. - grados de libertad; S.C: - suma de cuadrados; C.M. - cuadrados medios; Fo - F calculada; Pr>F - probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; R² - coeficiente de correlación; C.V. - coeficiente de variación; D.E. - desviación estandar; R - repetición.

Los análisis de varianza indican que para cualquier nivel de significancia las UFC/g_{Tez} del el testigo en telzone rojo presentaron diferencia significativa debido a la fuente de variación R (Tabla 30).

En la Tabla 31 se presentan las pruebas de Tukey que evalúan las diferencias en las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{Tez}) de *Fusarium oxysporum lycopersici*, entre las repeticiones para el testigo.

Tabla 31. Pruebas de Tukey para fuentes de variación sobre la variable (UFC/g_{Tez}) en el testigo de telzone rojo

Unidades de <i>Fusarium culmorum</i> (UFC/g _{Tez})		
F de V	Nivel	\bar{X} (UFC)
R	2	1030,50a
	3	758,25 b
	1	670,50 b
DMS _{0,05}	110,92	N=4

Donde: DMS₀₅ - diferencia mínima significativa; \bar{X} - media; F de V - fuente de variación; N - número de observaciones.

Las UFC/g_{Tez} de *Fusarium oxysporum lycopersici*, tuvieron un valor promedio general de 819.75. Fueron mayores en la repetición 2 en 26,41 % y 34,93 % que en las repeticiones 3 y 1 respectivamente, existiendo una diferencia entre estas dos últimas de 11,57 % (Tabla 31).

V.6.2 Presencia de Unidades Formadoras de colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* en peat moss (UFC/gpm) tras cada tratamiento

En la Tabla 32 se presenta las Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* presentes en cada tratamiento realizado sobre peat moss, en la tabla 33 se muestran las Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* presentes en el testigo.

Tabla 32. Unidades Formadoras de Colonias presentes después de la aplicación de tratamientos sobre peat moss

N	T	R	UFC/g _{pm}	N	T	R	UFC/g _{pm}	N	T	R	UFC/ g _{pm}
1	1	1	9	17	2	2	0	33	3	3	0
2	1	1	0	18	2	2	0	34	3	3	9
3	1	1	0	19	2	2	9	35	3	3	0
4	1	1	0	20	2	2	0	36	3	3	0
5	1	2	0	21	2	3	0	37	4	1	9
6	1	2	0	22	2	3	0	38	4	1	9
7	1	2	0	23	2	3	0	39	4	1	0
8	1	2	0	24	2	3	0	40	4	1	0
9	1	3	0	25	3	1	0	41	4	2	0
10	1	3	0	26	3	1	0	42	4	2	0
11	1	3	0	27	3	1	0	43	4	2	0
12	1	3	0	28	3	1	9	44	4	2	0
13	2	1	0	29	3	2	0	45	4	3	0
14	2	1	0	30	3	2	0	46	4	3	0
15	2	1	0	31	3	2	0	47	4	3	0
16	2	1	0	32	3	2	0	48	4	3	0

Donde: N - número de observación; T - tratamiento; R - repetición; SR - subrepetición; UFC/g_{pm} - Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum licoperisci* por gramo de peat moss.

Se observa en la Tabla 32 que la presencia de UFC/g_{pm} tendió a ser nula para cada tratamiento. La presencia de 9 UFC/g_{pm} por tratamiento se debe a la contaminación producida durante el manejo de las muestras y no a una ineficiencia del tratamiento de calor con aire caliente.

Tabla 33. Unidades de Formadoras de Colonias (UFC/g_{pm}) presentes en el testigo en peat moss

Testigo								
Media			Media			Media		
R	SR	(UFC/g _{pm})	R	SR	(UFC)	R	SR	(UFC/g _{pm})
1	1	414	2	1	702	3	1	585
1	2	270	2	2	675	3	2	468
1	3	135	2	3	720	3	3	369
1	4	558	2	4	747	3	4	414

En la Tabla 34 se presenta el análisis de varianza para evaluar las diferencias entre los tratamientos y repeticiones en las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{pm}) del hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* en peat moss, en la cual se observa que para cualquier nivel de significancia las UFC/g_{pm} en el testigo no presentaron diferencia significativa debido a las fuentes de variación T y R.

Tabla 34. Análisis de varianza para fuentes de variación sobre las Unidades de Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* en peat moss

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	11	101,25	9,2045	1,02	0,447
Error	36	324,00	9,0000		
Total corregido	47	425,25			
R ² = 0,2380	C.V.= 266,66	D.E= 3,0	\bar{X} =1,125		
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
T	3	0,0833	0,0277	0,24	0,870
R	2	0,3750	0,1875	1,69	0,199
T*R	6	0,7916	0,1319	1,19	0,334

Donde: F de V – fuente de variación; G.L. – grados de libertad; S.C. - suma de cuadrados; C.M. – cuadrados medios; Fo – F calculada; Pr>F – probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; R² – coeficiente de correlación; C.V. – coeficiente de variación; D.E. – desviación estandar; T – tratamiento; R - repetición.

En la Tabla 35 se presentan las pruebas de Tukey sobre los tratamiento (T) y repeticiones R en las variable Unidades Formadoras de Colonias de *Fusarium oxysporum lycopersici* (UFC/g_{pm}).

Tabla 35. Pruebas de Tukey de los tratamientos (T) sobre la variable UFC/g_{pm} en peat moss

Unidades de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> (UFC/g _{pm})			
F de V	Nivel	N	\bar{X} (UFC/g _{pm})
T	3	12	1,5a
	4	12	1,5a
	1	12	0,75a
	2	12	0,75a
	DMS _{0,05}		3,2985
R	1	16	2,250a
	2	16	0,563a
	3	16	0,563a
	DMS _{0,05}		2,5926

Donde: DMS₀₅ – diferencia mínima significativa; \bar{X} – media; F de V – fuente de variación; T – tratamiento; R - repetición; N – número de observaciones.

Las UFC/g_{pm} tuvieron un valor promedio general de 1,125. Fueron mayores en los tratamientos 3 y 4 en 50 % que en los tratamientos 2 y 4, resultando igual su valor entre los tratamientos 1 y 4, y entre los tratamientos 1 y 2. Fueron mayores en la repetición 1 que en las repeticiones 2 y 3, siendo éstas similares (Tabla 35).

En la Tabla 36 presenta los análisis de varianza de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC/g_{pm}) para evaluar la diferencia entre el testigo y los tratamientos sobre el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* en peat moss, en la cual se observa que las UFC/gpm del testigo en peat moss presentaron diferencia significativa en las repeticiones.

Tabla 36. Análisis de varianza para evaluar las diferencias entre los tratamientos y el testigo sobre la variable UFC/gpm en peat moss

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	2	281569,5	140784,7	9,85	0,005
Error	9	128688,75	14298,7		
Total corregido	11	410258,25			
R ² =0.6863	C.V.=23,6	D.E=119,5	\bar{X} =504,7		
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
R	2	281569,5	140784,7	9,85	0,005

Donde: F de V - fuente de variación; G.L. - grados de libertad; S.C. - suma de cuadrados; C.M. - cuadrados medios; Fo - F calculada; Pr>F - probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; R² - coeficiente de correlación; C.V. - coeficiente de variación; D.E. - desviación estándar;; R - repetición.

En la Tabla 37 se presentan las pruebas de Tukey en las repeticiones sobre la variable UFC/gpm de *Fusarium oxysporum lycopersici* en peat moss.

Tabla 37. Pruebas de Tukey en las repeticiones sobre la variable UFC/gpm

Unidades de <i>Fusarium oxysporum lycopersici</i> (UFC/gpm)			
F de V	Nivel	N	\bar{X} (UFC/gpm)
R	2	4	711,0 a
	3	4	459,0 b
	1	4	344,25 b
DMS _{0,05}			236,08

Donde: DMS₀₅ - diferencia mínima significativa; \bar{X} - media; F de V - fuente de variación; N - número de observaciones.

Las UFC/gpm de *Fusarium oxysporum lycopersici*, tuvieron un valor promedio general de 504,75. Fueron mayores en la repetición 2 en 35,44 % y 51,58 % que en las repeticiones 3 y 1 respectivamente, existiendo una diferencia entre estas dos últimas de 25 % (Tabla 37).

V.6.3 Incidencia de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) del hongo (*Lycopersicon esculentum* L.) en las plantas cultivadas en telzone rojo

En la Tabla 38 se muestran las incidencias de las Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de tratamientos en telzone rojo y, en la Tabla 39 se muestran para testigo.

Tabla 38. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de tratamientos en telzone rojo

T	R	IUFC	T	R	IUFC
1	1	10	3	1	30
1	2	20	3	2	20
1	3	20	3	3	20
2	1	20	4	1	30
2	2	10	4	2	10
2	3	20	4	3	30

Donde: T - tratamiento; R - repetición; IUFC - Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias.

El porcentaje de incidencia indica que de cada 10 plantas, el porcentaje de plantas dado por la incidencia fue afectado por el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*. Así un valor de IUFC de 10 % significa que de 10 plantas 1 fue infectada por el hongo. Es importante mencionar que la incidencia presentada en la Tabla 38 para cada repetición es muy probable que se debe a contaminación ajena al material desinfectado, puesto que junto al invernadero donde se tuvieron las plantas había invernaderos donde se tenían tratamientos con el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*.

Tabla 39. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) presentes en el testigo para telzone rojo

R	IUFC
1	100
2	90
3	100

Donde: R - repetición; IUFC – Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias.

La Incidencia Formadora de Colonias tuvo un valor promedio de 96,66 %, la cual indica que de cada 10 plantas 9,66 plantas se encuentran afectadas por el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* (Tabla 39).

En la Tabla 40 se presentan los análisis de varianza para las incidencias de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*. en las plantas de jitomate desarrolladas en telzone rojo.

Tabla 40. Análisis de varianza de los tratamientos y repeticiones sobre la variable IUFC en telzone rojo

F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	5	283,333	56,6666	1,07	0,45
Error	6	316,666	52,7777		
Total corregido	11	600,000			
R ² = 0,4722	C.V.= 36,32	D.E.=7,26	\bar{X} =20,0		
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
T	3	133,3333	44,4444	0,84	0,518
R	2	150,0000	75,000	1,42	0,312

Donde: F de V - fuente de variación; G.L. - grados de libertad; S.C: - suma de cuadrados; C.M. - cuadrados medios; Fo - F calculada; Pr>F - probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; R² - coeficiente de correlación; C.V. - coeficiente de variación; D.E. - desviación estandar; T - tratamiento; R - repetición.

Los análisis de varianza indican que la variable IUFC no presentó diferencia significativa para ningún nivel de significancia debido a las fuentes de variación T y R (Tabla 40).

En la Tabla 41 se presentan las pruebas de Tukey para fuentes de variación sobre la variable Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) en las plantas de jitomate desarrolladas en telzone rojo.

Tabla 41 Pruebas de Tukey para los tratamientos (T) y repeticiones (R) sobre la variable (IUFC) en telzone rojo

Unidades de <i>Fusarium culmorum</i> (IUFC)		
F de V	Nivel	\bar{X} (IUFC)
T	3	23,333a
	4	23,333a
	1	16,667a
	2	16,667a
DMS _{0,05}	20,534	N=3
R	1	22,500a
	3	22,500a
	2	15,000a
DMS _{0,05}	15,761	N=4

Donde: DMS₀₅ - diferencia mínima significativa; \bar{X} - media; F de V - fuente de variación; N - número de observaciones.

La IUFC del hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*, tuvo un valor promedio general de 20 %, lo cual indica que de cada 10 plantas 2 plantas estuvieron afectas por el hongo. Fue mayor en los tratamientos 3 y 4 en 28,56 % que en los tratamientos 1 y 2, resultando igual su valor entre los tratamientos 3 y 4, y entre los tratamientos 1 y 2. Su valor resultó igual en las repeticiones 1 y 3, existiendo una diferencia de estas dos repeticiones con la repetición 2 de 33,33 % (Tabla 41).

V.6.4 Incidencia de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) del hongo (*Fusarium oxysporum lycopersici*) en las plantas cultivadas en peat moss

En la Tabla 42 se muestran las Incidencias de las Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de tratamientos en las plantas de jitomate desarrolladas en el sustrato peat moss y, en la Tabla 43, se muestran para el testigo

Tabla 42. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias después de la aplicación de tratamientos en peat moss

T	R	IUFC	T	R	IUFC
1	1	0	3	1	0
1	2	10	3	2	30
1	3	0	3	3	10
2	1	0	4	1	0
2	2	10	4	2	20
2	3	10	4	3	0

Donde: T - tratamiento; R - repetición; IUFC - Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias.

El porcentaje de incidencia indica que de cada 10 plantas, el porcentaje de plantas dado por la incidencia fue afectado por el hongo *Fusarium oxysporum licopersici*. Así un valor de IUFC de 10 % significa que de 10 plantas 1 fue infectada por el hongo. Es importante mencionar que la incidencia presentada en la Tabla 42 para cada repetición es muy probable que se debe a contaminación ajena al material desinfectado, puesto que junto al invernadero donde se tuvieron las plantas había invernaderos donde se tenían tratamientos con el hongo *Fusarium oxysporum licopersici*.

Tabla 43. Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) presentes en el testigo

R	IUFC
1	100
2	90
3	90

Donde: R - repetición; IUFC – incidencia en las unidades formadoras de conidios.

La Incidencia Formadora de Colonias en las plantas de jitomate desarrolladas en el sustrato peat moss tuvo un valor promedio de 93,33 %, la cual indica que de cada 10 plantas 9,33 plantas se encuentran afectadas por el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici* (Tabla 43).

En la Tabla 44 se presentan los análisis de varianza para las Incidencias de las Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) del hongo *Fusarium oxysporum licoperchisi* en las plantas de jitomate desarrolladas en el sustrato peat moss.

Tabla 44. Análisis de varianza de los tratamientos sobre la variable IUFC en peat

moss					
F de V	G.L.	S.C.	C.M.	Fo	Pr>F
Modelo	5	808,333	161,6666	4,48	0,047
Error	6	216,666	36,1111		
Total corregido	11	1025,000			
R ² = 0,78	C.V.=	D.E.=6,00	\bar{X} =7,500		
	80,12	92			
Desglose de los análisis de varianza para las fuentes de variación					
T	3	158,333	52,7777	1,46	0,316
R	2	650,000	325,0000	9,00	0,015

Donde: F de V - fuente de variación; G.L. - grados de libertad; S.C: - suma de cuadrados; C.M. - cuadrados medios; Fo - F calculada; Pr>F - probabilidad de que F de tablas sea mayor que Fo; R² - coeficiente de correlación; C.V. - coeficiente de variación; D.E. - desviación estandar; T - tratamiento; R - repetición.

Los análisis de varianza indican que la variable IUFC presentó diferencia significativa al 5 % de nivel de significancia debido a la fuente de variación R (Tabla 44).

Pruebas de Tukey.

En la Tabla 45 se presentan las pruebas de Tukey para fuentes de variación sobre la variable Incidencia de Unidades Formadoras de Colonias (IUFC) en las plantas de jitomate rojo desarrolladas en el sustrato peat moss, después de aplicar los tratamientos.

Tabla 45. Pruebas de Tukey de los tratamientos sobre la variable IUFC en peat moss

Unidades de <i>Fusarium oxysporum licopersici</i> (IUFC)				
F de V	Nivel	N	\bar{X} (IUFC)	
T	3	3	13,333a	
	2	3	6,667a	
	4	3	6,667a	
	1	3	3,333a	
	DMS _{0,05}		16,985	
R	2	4	17,500a	
	3	4	5,000ab	
	1	4	0,000 b	
	DMS _{0,05}		13,037	

Donde: DMS₀₅ – diferencia mínima significativa; \bar{X} – media; F de V – fuente de variación; T – tratamiento; R – repetición; N – número de observaciones.

Tuvo un valor promedio general de 7,5 %, lo cual indica que de cada 10 plantas 0,75 estuvieron afectadas por el hongo *Fusarium oxysporum licopersici*. Fue mayor en el tratamiento 3 en 49,99 % y 75 % que en los tratamientos 2 y 4, y 1 respectivamente. Resultando igual su valor entre los tratamientos 2 y 4., existiendo una diferencia de los tratamientos 2 y 4 con el tratamiento 1 de 50 % (Tabla 45).

V.7 Resumen de resultados

En la Tabla 46 de muestran las propiedades de los sustratos agrícolas que influyen en la transmisión de calor.

Tabla 46. Propiedades de los sustratos bajo estudio					
	HG	HV	DAPh	DAPs	Cv
	(%)	(%)	(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)	(kJ m ⁻³ °C ⁻¹ .)
Tezontle rojo	7,7	8,12	1170,58	1089,185	4205,71
			4		
Peat moss	163,2	18,51	300,231	115,041	3408,07

Donde: HG - humedad gravimétrica; HV - humedad volumétrica; DAPh - densidad aparente en húmedo; DAPs - densidad aparente en seco; Cv - calor específico volumétrico.

En la Tabla 47 se muestran los valores del coeficiente de transmisión global de calor de un sistema de calentamiento por convección con los tres caloportadores estudiados: aire caliente, vapor de agua y agua caliente.

Como es sabido el coeficiente de transmisión de calor (h) depende del número adimensional de Nussel según la ecuación (67) donde k es la conductividad térmica del fluido y D es diámetro de la conducción. A su vez el número de Nussel se relaciona con el número de Prandtl (69) y de Reynolds (70) mediante la ecuación (68) donde α , β y γ se determinan experimentalmente.

$$[Nu] = \frac{D \cdot h}{k} \quad (67)$$

$$[Nu] = \alpha \cdot [Pr]^\beta \cdot [Re]^\gamma \quad (68)$$

Número de PRANDTL : $[Pr] = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (69)$

donde

μ : viscosidad dinámica ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
 Cp : calor específico a presión constante ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
 k : conductividad térmica del fluido ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)

Número de REYNOLDS: $[Re] = \frac{w \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad (70)$

donde

w : velocidad del fluido (m s^{-1})
 ρ : densidad del fluido (kg m^{-3})
 D : diámetro de la conducción (m)
 μ : viscosidad dinámica ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)

Por tanto, el coeficiente de película h depende de:

μ : viscosidad dinámica ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)
 Cp : calor específico a presión constante ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
 k : conductividad térmica del fluido ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
 w : velocidad del fluido (m s^{-1})
 ρ : densidad del fluido (kg m^{-3})
 D : diámetro de la conducción (m)

Dado que la densidad, conductividad térmica, y calor específico son conocidas, en la Tabla 47 se muestra el rango de diámetros de las tuberías externa e interna en el sistema concéntrico junto las velocidades de sustrato y caloportador para las cuales los coeficientes obtenidos son aplicables.

Tabla 47. Rangos de diseño para intercambiadores de calor destinados a desinfección de suelos y sustratos agrícolas

F.C.	Sustrato agrícola	V.F. m s ⁻¹	V.S. mm s ⁻¹	D.Int. (mm)	D.Ex. (mm)	hi (J s ⁻¹ m ⁻² °C ⁻¹)
Aire caliente	Tezontle rojo	0,50	1,36	114,66	121,30	0,631
		2,50	1,63	136,98	153,21	0,828
Aire caliente	Peat moss	0,50	1,36	118,33	120,13	0,438
		2,50	1,63	163,80	186,42	0,864
Vapor de agua	Tezontle rojo	0,50	1,36	114,66	127,44	0,651
		2,50	1,63	136,98	152,92	0,828
Vapor de agua	Peat moss	0,50	1,36	118,33	119,80	0,438
		2,50	1,63	163,80	185,04	0,864
Agua caliente	Tezontle rojo	0,50	1,36	114,66	141,85	0,631
		2,50	1,63	136,98	199,81	0,828
Agua caliente	Peat moss	0,50	1,36	118,33	133,87	0,438
		2,50	1,63	163,80	196,82	0,864

Donde: F.C. – fluido caloportador; V.F. – velocidad del fluido; V.S. – velocidad del sustrato; D.Int. – diámetro interior; D.Ext. – diámetro exterior; hi – coeficiente de transferencia de calor.

Los valores de la Tabla 47 con longitudes de los cilindros de desinfección de 2000 y 3000 mm suponen un calor transferido de entre 46,257 J.s⁻¹ y 48,580 J.s⁻¹. Esto produce el alcance de temperaturas entre 114 y 120°C en 1860 segundos de tratamiento.

Los diámetros y las velocidades consideradas en el desplazamiento del sustrato a desinfectar supone productividades del proceso de 7,845E-6 m³.s⁻¹ y 8,71E-6 m³.s⁻¹

En relación con la construcción del intercambiador de calor para desinfección de suelos y sustratos agrícolas el *Diámetro y longitud del cilindro interior y exterior, y diámetro del material aislante del intercambiador de calor debe ir comprendido de la siguiente forma:*

1. El cilindro interior tiene un diámetro de 116.3 mm y una longitud de 2450 mm.

2. El cilindro exterior tiene un diámetro de 140 mm y una longitud de 2450 mm.
3. El material aislante tiene un diámetro de 203.2 mm y una longitud de 2450 mm.

La superficie de transferencia de calor en el cilindro concéntrico interior del intercambiador de calor debe ser de 0,895151 m².

Respecto al torque y potencia demandados por el modelo teórico:

1. Para un diámetro del cilindro concéntrico interior de 116.3 mm, una longitud promedio de 2000 mm el torque y la potencia demandados fueron de 10,807 W y 81,264 N-m respectivamente.
2. Para un diámetro del cilindro concéntrico interior de 116,3 mm, una longitud promedio de 2500 mm el torque y la potencia demandados fueron de 13,509 W y 81,264 N-m respectivamente.
3. Para un diámetro del cilindro concéntrico interior de 116,3 mm, una longitud promedio de 3000 mm el torque y la potencia demandados fueron de 16,211W y 81,264 N-m respectivamente.

Se ha demostrado que un sistema de desinfección basado en tuberías concéntricas con diámetros comprendidos entre 114,66 y 136,98 mm de diámetro interior, y entre 121,30 y 153,21 mm de diámetro exterior, con longitudes entre 2000 y 3000 mm resulta efectivo para la desinfección tanto de tezontle rojo como de sustrato peat moss infectados con el hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*. Para ello las temperaturas alcanzables estarían comprendidas entre 114 y 120 °C en 1860 s.

Las plantas de jitomate rojo (*Solanum lycopersicon*, L.) no resultan afectadas por los sustratos desinfectados bajo las condiciones descritas.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado que la consideración del suelo y sustratos peat moss y telzone rojo como un fluido al ser movido por un tornillo sin fin dentro de una tubería permite aplicar las leyes de la convección en su calentamiento.

Basándonos en estas leyes se ha desarrollado un modelo de cálculo para el diseño de intercambiadores de calor de cilindros concéntricos para desinfección de suelos y sustratos agrícolas en continuo mediante aplicación de calor con agua caliente, vapor de agua y aire caliente. Se ha demostrado que los sistemas de convección en continuo son factibles para la desinfección.

Para la aplicación del modelo de cálculo es necesario conocer los parámetros termodinámicos característicos: capacidad calorífica, conductividad y difusividad.

Las propiedades termodinámicas de los tipos de sustratos probados, un sustrato peat moss y un sustrato telzone rojo son las siguientes: Densidad media: $300,23 \text{ kg m}^{-3}$, y $1169,60 \text{ kgm}^{-3}$ respectivamente; calor específico: $3,4 \text{ MJ m}^{-3}\text{°C}^{-1}$ y $4,1 \text{ MJ m}^{-3}\text{°C}^{-1}$, conductividad: $8,6 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y $9,97 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$, difusividad: $2,73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, y $2,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. Se probó que la humedad y la compactación no influyen en estos parámetros en los rangos analizados.

Por otra parte se analizó el coeficiente de transmisión de calor del sistema tal que estos materiales se van desplazando por el cilindro central movidos a través de un tornillo sin fin, y el fluido caloportador por la corona externa. Los coeficientes de película de los sustratos probados son: $0,65 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $0,73 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para peat moss y telzone rojo respectivamente.

Se ha construido un dispositivo para la validación de los cálculos. Los ensayos de desinfección sobre un sustrato tezontle rojo y sustrato peat moss infectados con hongo *Fusarium oxysporum lycopersici*, eliminaron prácticamente el 100% de las colonias. Tras la desinfección plantas de jimote rojo (*Solanum lycopersicon*, L.) fueron cultivadas sobre los sustratos tratados y no desarrollaron afecciones.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir con líneas de investigación generando tablas de coeficientes de película para distintos tipos de suelo con diferente textura, y humedad. Es necesario probar el sistema de desinfección propuesto con mas variedad de microorganismos.

VII. PUBLICACIONES DE LA TESIS

Libros con ISBN:

1. CHÁVEZ A. N., ROMANCHICK K. E., GRACIA-L. C., VELÁZQUEZ M. B., 2008. Desinfección de suelos y sustratos en la agricultura: Métodos y equipos. Primera edición, Ed. Universidad Autónoma Chapingo, México. ISBN: 978 968 02 0400 7. 234 pp.

2. SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL, 2010. Desinfección de Suelos y Sustratos Agrícolas: Prácticas Seguras en el Sector Agrícola. Primera edición. Ed. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. México. Derechos reservados conforme a ley ISBN. 44 pp.

Capítulos de libro con ISBN:

1. Capítulo de libro con ISBN: 978-607-12-0008-2
(EDITORES) PÉREZ S. L., ROMANCHICK-K. E., ALMENGOR S. R., 2008. La Ingeniería Agrícola-Motor del Desarrollo de la Agricultura Mexicana. Primera edición. México. p 383-401.

(CHÁVEZ A. N., ROMANCHICK K. E., CRUZ M. P., VELÁZQUEZ M. B., HERNÁNDEZ G. J. G., 2008. Diseño y construcción de un generador de vapor de agua.)

2. Capítulo de libro con ISBN: 978-607-12-0356-4
(EDITORES – COMPILADORES): ROMANCHICK-K. E, LÓPEZ C. G. de J.; FITZ R. E., 2014. Desarrollos de Ingeniería Agrícola en America Latina. Primera edición. México. p. 236-245.

(CHÁVEZ-A. N., RESENDIZ C. O., ACOSTA R.M., ROMANCHICK-K. E., GARCÍA S. S.; VELÁZQUEZ M. B., BELTRÁN LARA L. A., 2014. Evaluación técnica de una máquina térmica para desinfección en continuo de sustratos agrícolas con aire caliente por convección.)

Revistas:

1. CHÁVEZ-A. N., GRACIA-L. C., ROMANCHICK-K. E., ACOSTA R.M., LÓPEZ-R. E., 2010. Diseño, construcción y evaluación de un equipo tipo baúl para desinfección de sustratos agrícolas con calor. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 1(1) p. 5-15.

2. CHÁVEZ A. N., ROMANCHICK K. E., GRACIA L. C., VELÁZQUEZ M. B., 2009 Diseño y construcción de un equipo tipo remolque para desinfección de sustratos agrícolas con calor. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 1(2): p. 127-136.

Congresos:

1. CHÁVEZ A. N., GRACIA L. C., ACOSTA R. M., LÓPEZ R. E., ROMANCHICK K. E., 2004. Diseño, construcción y evaluación de un equipo para desinfección de sustratos y recipientes mediante aplicación de calor con aire caliente y con vapor de agua-aireado. VI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola del 22 al 24 de noviembre de 2004, San José Costa Rica.

2. CHÁVEZ A. N., GRACIA L. C., ACOSTA R. M., LÓPEZ R. E., ROMANCHICK K. E., 2005. Diseño, construcción y evaluación de un equipo para desinfección de sustratos y recipientes mediante aplicación de calor con aire caliente y con vapor de agua-aireado. VIII Congreso Nacional Agronómico del 27 al 28 de Abril de 2005. Chapingo México.

3. CHÁVEZ A. N., ROMANCHICK K. E., GRACIA L., VELÁZQUEZ M. B., 2008. Diseño y construcción de un equipo tipo remolque para desinfección de sustratos agrícolas con calor. VIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, del 7 al 9 de mayo de 2008 en Managua, Nicaragua.

4. CHÁVEZ A. N., ROMANCHICK K. E., CRUZ M. P., VELÁZQUEZ M. B., HERNÁNDEZ G. J. G., 2008. Diseño y construcción de un generador de vapor de agua. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola del 24 al 26 de septiembre de 2008, en la Universidad Autónoma Chapingo, México.

5. CHÁVEZ A. N., VELÁZQUEZ M. B., 2008. Diseño y construcción de un aparato para medir las propiedades térmicas de suelos y sustratos agrícolas. VIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, del 7 al 9 de mayo de 2008 en Managua, Nicaragua.

6. CHÁVEZ A. N., RAMANTCHICK K. E.; GARCÍA S. S.; RESENDIZ C. O.; BAUTISTA H. E.; MIRANDA D. R., 2010. Evaluación de un aparato para medir las propiedades térmicas de suelos y sustratos agrícolas. IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. CLIA 2010,

XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010. Vitória - ES, Brasil, 25 a 29 de julho 2010.

7. CHÁVEZ A. N., ROMANTCHICK K. E., PÉREZ S. L., HIDALGO R. M., CRUZ M. P., MURILLO R. O., 2010 Instrumentación y operación técnica de una caldera de tamaño pequeño. . IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. CLIA 2010, XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010. Vitória - ES, Brasil, 25 a 29 de julho 2010.

8. CHÁVEZ A. N., ROMANTCHIK K. E., VELÁZQUEZ M. B., 2011 Diseño y construcción de una máquina para desinfección en continuo de suelos y sustratos agrícolas con calor. XIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas del 27 al 29 de Abril de 2011. Chapingo México.

9. CHÁVEZ A. N., RESÉNDIZ C. O., GARCÍA S. S., ROMANTCHIK K. E., VELÁZQUEZ M. B., BAUTISTA H. E., MIRANDA D. R., 2014. Propiedades térmicas de un suelo franco arenoso para diseñar una máquina térmica para desinfección de suelos con calor. XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. 6 al 10 de octubre de 2014, Cancún, Quintana Roo, México.

10. CHÁVEZ A. N., GARCÍA S. S., RESÉNDIZ C. O., ROMANTCHIK K. E., VELÁZQUEZ M. B., BAUTISTA H. E., MIRANDA D. R., 2014. Propiedades térmicas de un sustrato peat moss para diseñar una máquina para desinfección de suelos y sustratos agrícolas con calor. XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. 6 al 10 de octubre de 2014, Cancún, Quintana Roo, México.

11. CHÁVEZ A. N., ROMANTCHIK K. E., RESÉNDIZ C. O., GARCÍA S. S., VELÁZQUEZ M. B., BELTRÁN L. L. A., 2014. Diseño, construcción y calibración de una máquina térmica para desinfección en continuo de suelos y sustratos agrícolas con aire caliente. XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola. 6 al 10 de octubre de 2014, Cancún, Quintana Roo, México.

12. CHÁVEZ A. N., RESÉNDIZ C. O., ACOSTA R. M., ROMANTCHIK K. E., GARCÍA S. S., VELÁZQUEZ M. B., BELTRÁN L. L. A., 2014. Evaluación técnica de una máquina térmica para desinfección en continuo de sustratos agrícolas con aire caliente por convección. XI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, XXIII Congreso

Nacional de Ingeniería Agrícola. 6 al 10 de octubre de 2014, Cancún, Quintana Roo, México.

Tesis de grado de Licenciatura

1. BAUTISTA H. Y MIRANDA D. R. E., 2008. Evaluación de un aparato para medir las propiedades térmicas de suelos y sustratos agrícolas. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. 183 pp.
2. GONZÁLEZ G. P. Y MORALES P. R., 2010. Determinación de propiedades térmicas del tezontle y suelo arcilloso para su aplicación al diseño de una máquina desinfectadora. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. 148 pp.
3. HERNÁNDEZ G. J. G., 2009. Diseño, construcción y evaluación técnica de un generador de vapor de agua. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. 110 pp.
4. MURILLO R. O., 2010. Evaluación técnica de una caldera pequeña que tiene como fuente de energía gas L.P. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. 126 pp.
5. BELTRÁN LARA L. A., 2012. Evaluación técnica de un equipo para la desinfección de suelos y sustratos en continuo a través de la aplicación de aire caliente. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Estado de México. 147 pp.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

ABU-HAMDEH N.H AND REEDER C. RANDALL, 2000. Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1285–1290.

ARMY AIR FORCE, 1988. Technical manual: arctic and subarctic construction calculation methods for determination of depth of freeze and thaw in soil: arctic and subarctic construction. Army Air Force TM 5-852-6/AFR 88-19, Volume 6.

ALOISE DE L. J., R. SHENDE, C. MERCADO, C. GILFILLAN Y S. R. KIKWE, 2001. Floriculture and the environment: Growing flowers without methyl bromide. Ed. United Nations Publication. UNEP DTIE. 125pp.

ALPI A. Y F. TOGNONI, 1999. Cultivo en invernadero. 3ª edición. Ed. Mundi-Prensa. España. Versión española por Cerisola C.I. y Domínguez Castillo E. 347 pp.

ASCARD J., 1998. Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control. *Weed Research* 38, 69-76.

BARKER A.V., CRAKER L.E., 1991. Inhibition of weed-germination by microwaves. *Agronomy Journal* 83, 302-305.

BAKER V.H., WIANT D., TABOADA O., 1956. Some effects of microwaves on certain insects which infest wheat and flour. *J. Econ. Entomology* 49, 33-37.

BEJARANO G. F., 2002. La espiral del veneno: Guía crítica ciudadana sobre plaguicidas. Ed. Red de acción sobre plaguicidas y alternativas en México. México. 226 pp.

BOODLEY J.W., 1996. The commercial greenhouse. 2ª edición. Ed. Delmar Publishers. USA. 612 pp.

BRAUN A. L., SUPKOFF D.M., 1994. Options to Methyl Bromide for Control of Soil-Borne Diseases and Pests in California with reference Netherlands.

BROWN C E., 1999. Superheated steam delivering apparatus and agricultural methods therewiht.
United States Patent. Patent Number: 5,867,935 Date of Patent: Feb. 9, 1999

BRUTON B.D., 1998. Soilborne diseases in Cucurbitaceae: Pathogen virulernce and host resistente. Cucurbitaceae'98.

BURÉS, S., 1997. Sustratos. Ed. Agrotécnicas S.L. España. 342 pp.

CAVALANTE, M.J.B., MUCHOVEJ J.J., 1993. Microwave irradiation of seeds and selected fungal spores. *Seed Science and technology* 21, 247-253.

ÇENGEL A. Y. Y BOLES A. M., 2006. Termodinámica. 5ª Ed. Ed. McGrawHill. México. pp 178-180

ÇENGEL A., 2004. Tranferencia de calor. 2ª Ed. Ed. McGrawHill. México. 793 pp

CENIS J.L., 1989. Temperature evaluation in solarized soils by Fourier-analysis. *Phytopathology* 79 (5), 506-510.

CHÁVEZ A.N., ROMANTCHICK K E., GRACIA L. C. Y VELÁZQUEZ M. B., 209. Desinfección de Suelos y Sustratos en la Agricultura: Métodos y Equipos. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. México. 234 pp.

CHÁVEZ A.N., ROMANTCHICK K. E., GRACIA L. C.; VELÁZQUEZ M. B., 209. Diseño, y construcción de un equipo tipo remolque para desinfección en estático con calor de sustratos agrícolas. *Revista Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1 (2): 69-76.

CHÁVEZ A.N., ROMANTCHICK K. E., GRACIA L. C.; ACOSTA R. M. Y LÓPEZ R E., 2010. Diseño, construcción y evaluación de un equipo tipo baúl para desinfección de sustratos agrícolas con calor. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1 (1): 17-26.

DAVIS F., WAYLAND J., MERKLE M., 1971, Ultrahigh-frequency electromagnetic fields for weed control: phytotoxicity and selectivity. *Science* 173, 535-537.

DEV H., CONDORELLI P., BRIDGES J., ROGERS C., DOWNEY D., 1986. ENVR. In-situ radio-frequency heating process for decontamination of soil. *Abstract of Papers of the American Chemical Society* 191. pp. 96.

DÍAZ T., E. ESPÍ, A. FONTECHA, J.C. JIMÉNEZ, J. LÓPEZ, A. SALMERÓN, 2001. Los Filmes Plásticos en la producción agrícola. Ed. Repsol YPF-Mundi-Prensa. 320 pp.

FRENCH E. R. Y TI HEBERT, 1997. Soil preparation and disinfecting: Extracted from methods of phytopathology. Ed. IICA. San José, Costa Rica. Ed. Centro Internacional de la papa (CIP). 12 pp.

GEHRING, 1991. Solvents, fumigants and related compounds. *Handbook of pesticide toxicology*. Academic Press, San Diego CA, 2, 637-730 p.

GIOVANNINI G., LUCCHESI S., GIACHETTI M., 1990. Effects of heating on some chemical-parameters related to soil fertility and plant-growth. *Soil Science* 149, 334-350.

GRACIA, L. C., Y E. P. MARTÍN-PORTUGUÉS, 1983. Mecanización de los cultivos hotícolas. Ed. Mundi-Prensa. España. 243 pp.

HALL, R., 1996. Principles and practice of managing soilborne plant pathogens. Ed. American Phytopathological Society. USA.

HAMID M.A.K AND BOULANGER R.J., 1969. A new method for the control of moisture and insect infestation of grain by microwave power. *Journal of Microwave Power* 4 n° 1, 11-18.

HOCKSTRA P., DELANEY A., 1974. Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research* 79, 1699-1708.

HUDSON T. H.; DALE E. K.; FRED T. D. JR., 1990. Plant Propagation: Principles and Practices. Ed. Prentice-Hall. USA.

JARVIS W.R., 1998. Control de enfermedades en cultivo de invernadero. Ed. Mundi-Prensa. España. Traducción por Mateo Box J.M. 334 pp.

JORDÁ C., J.M. OSCA, J. GISBERT, J. ARMENGOL, A. LACASA, B. VELÁZQUEZ-M. B., 2002. El tratamiento con microondas para la desinfección de suelos. *Phytoma España* 138: 118-121

KATAN J., GREENBERGER, A. ALON H., GREENSTEIN A., 1976. Solar Heating by polyethylene mulching control of diseases caused by soil-borne pathogens. *Phytopathology* 66, 683-688.

KATAN J., 1980. Solar pasteurisation of soils for disease control: status and prospects. *Plant Disease* 64, 450-454.

LAGUË, C., CHENARD, L., P. SAVARD., 1992. Engineering performance of propane burners used for weed and pest insect control. *ASAE meeting presentation, Internacional Winter Meeting. Nashville, Tennessee.* paper n° 92, pp. 1598.

LANGHANS R. W., 1990. Greenhouse Management: A guide to structures, environmental control, materials handling, crop programming and business analysis. Ed. Halcyon Press of Ithaca. USA. 274 pp.

LORENTE H. J. B., MA. PAZ YUSTE PÉREZ, JANEZ GOSTINCAR I. TURON, 1998. Biblioteca de la agricultura: Suelos, abonos y materia orgánica. Los frutales 1. 1-264 pp.

LORENTE H. J. B., MA. PAZ YUSTE PÉREZ, JANEZ GOSTINCAR I. TURON, 1998. Biblioteca de la agricultura: Defensa de las plantas cultivadas. Técnicas agrícolas en cultivos extensivos 2. 265-527 pp.

LORENTE H. J. B., MA. PAZ YUSTE PÉREZ, JANEZ GOSTINCAR I. TURON, 1998. Biblioteca de la agricultura: Horticultura. Cultivo en invernadero 3. 528-768 pp.

MANUALES PARA LA EDUCACIÓN AGROPECUARIA, 1999. Horticultura. Ed. Trillas. México. 111 pp.

MANUALES PARA LA EDUCACIÓN AGROPECUARIA, 1999. Maquinaria para manejo de cultivos. Ed. Trillas. México. 78 pp.

MESSIAEN C.M., D. BLANCARD, F. ROUXEL Y R. LAFON, 19995. Enfermedades de las hortalizas. Ed. Mundi-Prensa. España. Versión española de Maroto Borrego J.V., B. Pascual España y V. Borrego Pitarch. 576 pp.

MINOBE T., K. MIKAMI, S. YAMAGUCHI, H. KANMURA, H. KATOU, Y. MIURA, 2003. Microwave continuous heating equipment with workpiece transport path having meandering shape. Patent Applications Publication. Pub. No. US 2003/0057204 A1. Pub. Date Mar. 27, 2003.

MINUTO A., 1999. Le alternative al bromuro di metile. *Suplemento a Colture Protte* 4, 26-36.

NELSON S.O., 1996. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. *Transactions of the ASAE*. 39 (4),1475-1484.

NELSON P.V., 1998. Greenhouse operation and management. 5ª edición. Ed. Prentice Hall. USA. 637 pp.

ORTIZ-CAÑAVATE J., 1980. Las máquinas agrícolas y su aplicación. Ed. Mundi-Prensa. España. 464 pp.

ORTIZ-CAÑAVATE J., 1995. Las máquinas agrícolas y su aplicación. Ed. Mundi-Prensa. España. 465 pp.

PERUZZI A., 1996. An experimental test bench for the study of flame weeding effects: first experimental results on rape plants (*Sinapis alba* L.). *International conference on Agricultural engineering* EuraAgeng, Madrid, Spain, Sept 23-26.

PIERCE J.H., 1977. Green House Grow How. Ed. Plants Alive Books. USA. 241 pp.

RANGELOV G.G., 2003. Method and system for exterminating pests, weeds and phatogens. Patent Application Publication. Pub. No. US 2003/0037482 A1. Date: Feb. 27, 2003.

ROBLEDO DE PEDRO F. Y VICENTE L. M., 1988. Aplicaciones de los plásticos en la agricultura. Segunda Edición. Ed. Mundi-Prensa. España. 320 pp.

ROVIRA F., GISBERT J., GRACIA C., 2001. Ensayos para la eliminación de malas hierbas con rayos infrarrojos. *Proceeding Congreso de Agroingeniería*, Valencia, Spain, Sept. 2001.

RUNIA, W.T., 1983. A recent development for steam sterilization. *Acta Horticulturae* 152, 195–199.

RUNIA, W.T., 2000. Steaming methods for soils and substrates. *Acta Horticulturae* 532, 115–123.

SRIVASTAVA A.K., C.E. GOERING AND R.P. ROHRBACH, 1993. *Engineering Principles of Agricultural Machines*. Ed. ASAE. USA. pp. 507-545.

SYKES G., 1958, *Disinfection and sterilization*. Ed. E.& F.N. Spon LTD. 396 pp.

TIPPENS P. E., 1996. *Física: Conceptos y aplicaciones*. 5ª edición. Ed. McGraw-Hill. México. 981 pp.

URRESTARAZU G. M., 2000. *Manual de cultivo sin suelo*. Ed. Mundi-Prensa. España. 648 pp.

URRESTARAZU G. M., 2004. *Tratado de Cultivo Sin Suelo*. Ed. Mundi-Prensa. España. 914 pp.

VELÁZQUEZ-MARTÍ B., C. GRACIA-LÓPEZ, C. JORDÁ, P. SAVALL, 2003. Tratamiento de sustratos destinados a semilleros por radiación de microondas. *Phytoma España* 149: 43-46

VELÁZQUEZ-MARTÍ B., C. GRACIA LÓPEZ, 2005. Development and evaluation of modular microwave applicator for agricultural soils and substratum disinfection in automatic sowing line of plant nurseries. *Acta Horticulturae (ISHS)* 691 : 671-678

WALLS I.G., 1992. *The complete book of the greenhouse*. 4ª edición. Ed. Ward lock. British.

WAYLAND J., DAVIS F., MERKLE M, 1973. Toxicity of UHF device to plant seeds in soil. *Weed Science* 21, 161-162.

WILSON J. D., 1996. Física. 2ª edición. Ed. Prentice Hall. México. 766 pp.

WORF, G. L., 1990. Selecting and Using Chemical Fumigants and Soil Sterilants for Ornamental Disease Control. Ed. Department of Agricultural Journalism, University of Wisconsin-Madison. USA.

Sitios Web consultados.

A.C.A. ENGINEERING & MANUFACTURING PTY LTD, 2003. Soil steam equipment.

BARTOK, J. W. JR., 1994. Steam sterilization of growing media. Proceedings, Forest and conservation nursery 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.fcnanet.org/proceedings/1994/bartok1.pdf>.

CEBOLLA V., MARTINEZ P., DEL BUSTO A., BARREDA G., 1998. La desinfección del suelo por energía solar (solarización). Una técnica no contaminante para la Agricultura del futuro. IVIA, Valencia España <http://www.ivia.es/vcebolla/solarizacion/solintro.htm> [5 Jun, 2001]

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2002. Steam as an Alternative to Methyl Bromide in Nursery Crops. URL: <http://www.epa.gov/>.

FMT INC., 2002. World Class Aqueous Parts Claning Systems. <http://www.fmtinc.com>.

NEM/CHEM/XLANDPRP, 2003. land preparation. <http://ucdnema.ucdavis.edu/imagemap/ent156html/204NEM/CHEM/XLANDPRP>.

NEM/PSTEAM, 2003. Steam sterilization. <http://ucdnema.ucdavis.edu/imagemap/nemmap/ent156html/204nem/psteam>.

NETHER.HTM, 1996. The Netherlands alternatives to methyl bromide. <http://www.ars.usda.gov/is/np/mba/oct96/nether.htm>

NOFZIGER D.L., 2005. Soil Temperature Changes with Time and Depth: Theory. <file:///C:/SoilPhysics/software/SoilTemperature/document.html>.

OHMSLAW S.HTM., 2003. Conceptos de electricidad. http://home.a-city.de/walter.fendt/phs/ohmslaw_s.htm

ROJO F., 2015. Labranza y Temperatura del suelo. http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/temperatura/labranza_y_temperatura_del_suelo.pdf.

WHITE G., 2000. Soil sterilization for the future – away from broad spectrum chemicals <http://www.soilboredisease.com/soilter.htm>

SIEBRING.HTML, 2003. Siebring steam N air. <http://www.usgr.com/soil-sterilization/siebring.html>

WILLIAMS-WOODWARD J. L., 2003. Sterilization and pasteurization of soil, ground beds, and potting mixes for greenhouses and commercial nurseries. http://www.ent.uga.edu/pmh/Horticultural/Crops/Woody_Ornamentals/sterilization.html

WILLIAMS-WOODWARD J. L., 2003. Sterilization and pasteurization of soil, ground beds, and potting mixes for greenhouses and commercial nurseries. http://www.ent.uga.edu/pmh/Horticultural/Crops/Woody_Ornamentals/sterilization.html

Algunas patentes consultadas.

- 1. Superheated steam delivering apparatus and agricultural methods therewiht.**
United States Patent.
Claude E. Brown.
Patent Number: 5,867,935
Date of Patent: Feb. 9, 1999

