



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.

POSGRADO

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
CALEFACCIÓN PARA HUERTAS MANZANERAS,  
ALIMENTADO POR PELLETS DE ASERRÍN***

“Tesis que como Requisito para obtener el Grado de Doctora en Ciencia y  
Tecnología Ambiental presenta:”

M. C. Mónica Moreno López

**Director**

Dr. Ignacio R. Martín Domínguez

Chihuahua, Chih. 2016

## *Agradecimientos*

---

Doy gracias a Dios por haberme otorgado infinitas bendiciones a lo largo de mi vida.

A todos los miembros de mi familia por su apoyo y comprensión.

A mi director de tesis, Dr. Ignacio Ramiro Martin Domínguez, por su incomparable guía, consejo y paciencia, sin lo cual no habría sido posible desarrollar este trabajo de investigación.

Muy especialmente a Dra. Myriam V. Moreno López, por su apoyo incondicional en todo momento.

Al personal del laboratorio de análisis químicos, Q.B. Silvia Miranda, Ing. Alejandro Benavidez y MC Patricia Peregrino.

Gracias a los doctores Eduardo Herrera, Alfredo Campos y Teresa Alarcón miembros de mi comité tutorial.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo que nos brinda a todas las personas que tenemos la inquietud de desarrollar un posgrado.

Gracias al centro de investigación en materiales avanzados (CIMAV) y a las empleadas de posgrado, amigas todas, les agradezco mucho su ayuda en todo momento, siempre las llevare en mi corazón.

Gracias CIMAV

## *Dedicatoria*

---

*A mi amada hija Priscilla, compañera incondicional en este camino que  
iniciamos juntas en el año 2003*

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
I. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. ANTECEDENTES.....	4
1.1.1. Fenómeno de la helada.....	4
1.1.2. Tipos de heladas .....	4
1.1.3. Métodos para acondicionamiento climático en las huertas .....	5
1.1.4 Patentes de dispositivos usados para la protección contra heladas .....	6
1.2. GENERALIDADES EN LAS HUERTAS MANZANERAS .....	9
1.2.1. Distribución en una huerta manzanera.....	10
1.2.2. Acondicionamiento de aire .....	11
1.3. OBJETIVO .....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos.....	13
1.4. HIPOTESIS.....	14
II METODOLOGIA.....	15
2.1 Transferencia de calor por convección .....	15
2.2. Balance de energía en el nuevo brote .....	17
2.2.1. Calculo de la temperatura del cielo .....	18
2.2.2 Calculo del coeficiente convectivo.....	20
2.2.3 Temperatura de combustión.....	22
2.3. Calculo del área radiante .....	25
2.3.1 COMSOL multiphysics .....	26
2.4 Construcción de Prototipo.....	29
2.5 Transferencia de calor por radiación.....	30
2.6 Emisiones .....	32
III RESULTADOS .....	33
3.1 Distribución del calor emitido por un calentón principalmente convectivo.....	33
3.2 Área radiante y construcción de Prototipo .....	38

3.3 Transferencia de calor por radiación.....	40
3.3 Comparación entre las emisiones generadas por un calentón común y el prototipo usando pellets de aserrín como combustible. ....	41
3.4 Análisis Económico .....	44
IV CONCLUSIONES .....	45
V TRABAJOS CITADOS .....	46
Anexo 1 Prácticas de Protección contra heladas (fuente: FAO 2005).....	50

Figura 1 Orchard Heating Device .....	6
Figura 2 Process of preventing frosts or heat injury in orchards.....	7
Figura 3 Temperature Moderator for Orchards and the like.....	8
Figura 4 Biomass Pellet-Burning Orchard Heaters.....	8
Figura 5 Aerosol Generating Rotary Pulse-Jet Orchard Heater.....	9
Figura 6 Distribución de los árboles en una Huerta Manzanera .....	10
Figura 7 Distribución de Calentones en una Huerta Manzanera .....	11
Figura 8 Calentones usados en huertas.....	12
Figura 9 Esquema de malla con termopares .....	15
Figura 10 Vista aérea de las mallas colocadas en la huerta manzanera.....	16
Figura 11 Análisis de la Pérdida de Calor .....	17
Figura 12 Temperatura del Cielo TRNSYS.....	19
Figura 13 Diferencia entre la temperatura del cielo y la Temperatura Ambiente .....	19
Figura 14 Cálculo del Coeficiente Convectivo EES .....	20
Figura 15 Preparando para experimentar con el quemado de pellets .....	22
Figura 16 Combustión de Pellets.....	23
Figura 17 Geometría (volumen de control-placa radiante-brote o flor) .....	28
Figura 18 Placa de lámina para medir temperatura.....	30
Figura 19 Localización de las placas con termopares .....	31
Figura 20 Calentones encendidos en una huerta .....	36
Figura 21 Prendidas en Cd. Cuauhtémoc (Fuente: XEPL noticias).....	37
Figura 22 Prototipo de calentón usando pellets de aserrín como combustible.....	38
Figura 23 Prototipo de calentón encendido .....	39

Grafica 1 Coeficiente convectivo (h) variando la temperatura ambiente de 0 a -14°C ..	21
Grafica 2 Coeficiente convectivo (h), con una velocidad del viento de 3m/s .....	21
Grafica 3 Combustión de Pellets FLUKE 4.....	24
Grafica 4 Combustión de Pellets FLUKE 6.....	24

Grafica 5 Termopares ubicados a 6m de altura.....	33
Grafica 6 Termopares localizados a 4.3m de altura .....	34
Grafica 7 Termopares localizados a 3.4m de altura .....	34
Grafica 8 Pluma de calor (la línea punteada azul es la temperatura ambiente) .....	35
Grafica 9 Termopares próximos al suelo (línea punteada azul es la temperatura ambiente).....	35
Grafica 10 Mediciones de CO donde ppm corresponde a las emisiones generadas por la combustión de pellets de aserrín y ppm_1 a las emisiones por la combustión de aceite residual de motor .....	41
Grafica 11 Medición de NOx donde ppm_1 corresponde a la combustión de aceite residual de motor.....	42
Grafica 12 Medición de SO2.....	42
Grafica 13 Medición de CO2 donde %_1 corresponde a las emisiones generadas por aceite residual de motor .....	43
Tabla 1 Parametros globales.....	27
Tabla 2 Localización de los termopares respecto a la posición del calentón radiativo ..	40
Tabla 3 Comparación de costo entre combustibles.....	44

## RESUMEN

---

Las heladas tardías, son un problema recurrente que se presenta en una gran variedad de siembras en todo el mundo, para mitigar los daños, los agricultores y fruticultores, hacen uso de los diferentes métodos de protección, combinando los mecanismos de transferencia de calor, sin embargo y a pesar de existir más de cincuenta patentes de dispositivos para aclimatar siembras, aun, una helada tardía es capaz de acabar con la producción anual. Desde el punto de vista de la climatología agrícola, no se puede considerar helada a la ocurrencia de una determinada temperatura, ya que existen vegetales que sufren las consecuencias de las bajas temperaturas sin que ésta llegue a cero grados, por ejemplo: el café, el cacao y otros vegetales tropicales.

El estado de Chihuahua es el primer productor nacional de manzana, y a pesar de ser el manzano un árbol que necesita una temperatura promedio anual de 10°C para su óptimo desarrollo, cuando se presentan heladas tardías primaverales, los nuevos brotes se ven afectados poniendo en riesgo la cosecha anual; Los fruticultores de la región comúnmente protegen sus huertas encendiendo calentones operados con algún tipo de combustible fósil, pudiendo representar un gran costo ambiental y económico su operación. En este trabajo se presenta una alternativa de solución al problema antes descrito, proponiendo el diseño y construcción de un calentón usando pellets de aserrín (biomasa) como combustible, mitigando la contaminación atmosférica generada en la temporada de “las prendidas”. Primero se analizó la distribución del calor emitido por un calentón principalmente convectivo en una huerta manzanera, resultando que el uso de este mecanismo de transferencia de calor no es del todo efectivo, de tal manera que se considera como una mejor opción desarrollar un calentón para huertas principalmente radiativo; después de realizar el balance de energía en los nuevos brotes, se simuló apoyándose en el software COMSOL Multiphysics y se encontró un área radiante óptima de 0.3m<sup>2</sup> con una inclinación de 68°; una vez construido el prototipo, se probó en campo resultando que este es capaz de proteger los brotes localizados hasta 3.6m de altura a una longitud de 4.5m alejadas del calentón con respecto a la normal. Enseguida se compararon las emisiones generadas por ambos calentones, resultando que la combustión de pellets presenta 24% menos CO, 22% menos NOx y no se generan emisiones de SO<sub>2</sub>, las emisiones de CO<sub>2</sub> son ligeramente mayores, pero se considera que es la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que el árbol capto durante su vida cerrando de esta manera su ciclo.

El área radiante y el ángulo de inclinación en el prototipo, se pueden ajustar dependiendo de la siembra que se desee proteger de las heladas tardías.

## ABSTRACT

---

Late frosts are a recurring problem that occurs in a variety of crops worldwide, to mitigate damage, farmers and fruit growers make use of different methods of protection, combining the mechanisms of heat transfer, without But despite the existence of more than fifty patents for devices to acclimatize crops, even, a late frost is able to end the annual production. From the point of view of the agricultural weather, you cannot consider freezing the occurrence of a certain temperature, as there are plants that suffer the consequences of low temperatures without it reaches zero degrees, for example: coffee, cacao and other tropical plants.

The state of Chihuahua is the first national producer of apple, and despite being the apple tree needs an average annual temperature of 10 ° C for optimal development, when spring late frosts occur, the new shoots are affected by putting in the annual harvest risk; Fruit farmers in the region protect its orchards lighting commonly heaters operated with some form of fossil fuel, can represent a major environmental and economic operation cost. In this paper an alternative solution to the problem described above is presented, proposing the design and construction of a heater using sawdust pellets (biomass) as fuel, mitigating air pollution generated in the season of "lit".

First heat distribution emitted by a mainly convective heater in an apple orchard was analyzed and found that the use of this mechanism of heat transfer is not entirely effective, so that it is considered as a better option to develop a heater for orchards mainly radiative; after performing the energy balance in the new outbreaks, the simulation was performed relying on the Multiphysics COMSOL software and optimal radiating area of 0.3m<sup>2</sup> was found with an inclination of 68 °; once the prototype built, tested in this field resulting is able to protect localized outbreaks to 3.6m height 4.5m length away from the heater with respect to the normal. Immediately emissions from both heaters were compared, resulting combustion of pellets has 24% less CO, 22% less NO<sub>x</sub> and no SO<sub>2</sub> emissions are generated, CO<sub>2</sub> emissions are slightly higher, but is considered to be the same amount CO<sub>2</sub> that the tree generated during his life thus closing the cycle.

The radiant area and the tilt angle in the prototype, can be adjusted depending on the seed to be protected from late frosts.

## I. INTRODUCCIÓN

---

A nivel mundial se producen aproximadamente 60 millones de toneladas de manzana al año, siendo China el principal productor con más de 20 millones de toneladas, seguido de Estados Unidos de América con 5.0 millones. Estos países aportan el 45% de la producción mundial, mientras que México aporta 0.46 millones de toneladas al año (Delegación SAGARPA Chih. 2005).

En México los estados con mayor superficie y producción de manzana son en orden de importancia Chihuahua, Durango y Coahuila. Las tendencias nacionales son estables en superficie pero inestables en cuanto a la producción debido a factores climáticos como las heladas tardías y el granizo entre otros.

Actualmente Chihuahua es el principal productor de manzana en el país con aportación de más del 58% (1). Los fruticultores de manzana protegen sus árboles de las inclemencias climáticas colocando mallas sobre ellos para evitar que el granizo arruine sus cosechas, y para mitigar las heladas, comúnmente usan calentones alimentados con aceite residual de motores diésel o de gasolina, al momento de la combustión, estos calentones generan grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, y partículas de metales pesados, ocasionando graves daños a la salud y el ambiente.

En este proyecto se propone una alternativa de solución al problema antes mencionado, diseñando un calentón para huertas manzaneras que use pellets como combustible. El pellet es aserrín comprimido que contiene un alto poder calorífico pero con un balance neutro en sus emisiones.

Los resultados aportados por este trabajo brindaran a los productores manzaneros, y en general a los agricultores de todo el planeta, una opción para proteger sus cosechas de las bajas temperaturas sin dañar el ambiente.

## 1.1. ANTECEDENTES

---

Las heladas tardías, son un problema recurrente que se presenta en una gran variedad de siembras en todo el mundo, para mitigar los daños, los agricultores y fruticultores, hacen uso de los diferentes métodos de protección, combinando los mecanismos de transferencia de calor (Anexo 1), sin embargo y a pesar de existir más de cincuenta patentes de dispositivos para aclimatar siembras, aun, una helada tardía es capaz de acabar con la producción anual.

### 1.1.1. Fenómeno de la helada

Se considera la ocurrencia de heladas cuando la temperatura del aire, registrada en el abrigo meteorológico (es decir a 1,50 metros sobre el nivel del suelo), es de 0°C. Esta forma de definir el fenómeno fue acordada por los meteorólogos y climatólogos, si bien muchas veces, la temperatura de la superficie del suelo puede llegar a ser 3 a 4°C menor que la registrada en el abrigo meteorológico.

Desde el punto de vista de la climatología agrícola, no se puede considerar helada a la ocurrencia de una determinada temperatura, ya que existen vegetales que sufren las consecuencias de las bajas temperaturas sin que ésta llegue a cero grados, por ejemplo: el café, el cacao y otros vegetales tropicales.

### 1.1.2. Tipos de heladas

Existen tres tipos básicos de heladas, y un cuarto tipo que es el resultado de la combinación de estos tres:

**Heladas por advección:** Se originan cuando una masa de aire frío invade una región. Se caracterizan por estar acompañadas por viento, afectando los lugares más altos y son de carácter macro climático, es decir que son heladas de tipo general, la temperatura disminuye en una gran región o país y pueden estar acompañadas de tiempo nublado o lluvioso produciendo severos daños a todos los cultivos. Afortunadamente ocurren en invierno cuando los manzanos están en su periodo de reposo y solo muy casualmente ocurren en primavera.

**Heladas por irradiación:** Se presentan en primavera, cuando las pérdidas de calor que sufre la superficie del suelo (por radiación) son superiores a los aportes que recibe. En términos micro meteorológicos, las heladas se producen cuando el balance de energía de la superficie del suelo es negativo, este se enfría demasiado durante la noche, afectando también las capas de aire cercano al mismo. Se caracterizan por producirse con cielo despejado, ausencia de viento y una humedad atmosférica baja, afectando más las zonas bajas, por acumulación de aire frío. Afectan el meso clima, es decir que son heladas de tipo parcial, que afectan solo una zona de una región o a veces, sólo a algunas fincas de determinada zona.

**Heladas por evaporación:** Se presentan cuando ingresa un frente frío y produce lluvia, esta agua que queda depositada sobre las plantas y el suelo, se evapora (ya que el aire que entra es frío y seco) a expensas de quitarle calor al suelo y a los órganos vegetales principalmente.

**Heladas mixtas:** Se producen por la combinación de heladas por advección, por irradiación y por evaporación. Una típica helada de este tipo, generalmente inicia con la entrada de un frente frío, el que produce nubosidad y al mismo tiempo enfría el ambiente. Paralelamente, las pérdidas por irradiación no son importantes ya que está nublado. Una vez que el frente pasó, la nubosidad se disipa, produciéndose una fuerte pérdida de calor por irradiación desde el suelo, lo que produce la helada. Otra situación más severa aun que la anterior es cuando previo a la entrada del frente frío se verifican condiciones de viento zonda, este viento seco, disminuye significativamente la humedad del ambiente, lo que provoca que cuando el frente frío haga su ingreso, no produzca nubosidad. Esta falta de nubosidad y baja humedad atmosférica favorecen las pérdidas por irradiación que se suman al descenso térmico producido por el frente frío (2), (3), (4).

### **1.1.3. Métodos para acondicionamiento climático en las huertas**

Para enfrentar las heladas y lograr una reducción en las pérdidas, es posible aplicar métodos de defensa activa o pasiva (5). Los métodos pasivos son aquellos en los que se hace uso de las características naturales del lugar donde se encuentra localizado el predio agrícola y se implementa antes de que la helada ocurra, entre los principales métodos pasivos están la selección del sitio, manejo de las corrientes de aire frío, cobertura de suelo, colocación de barreras corta viento, entre otras (6), (4), (7), (8), (9).

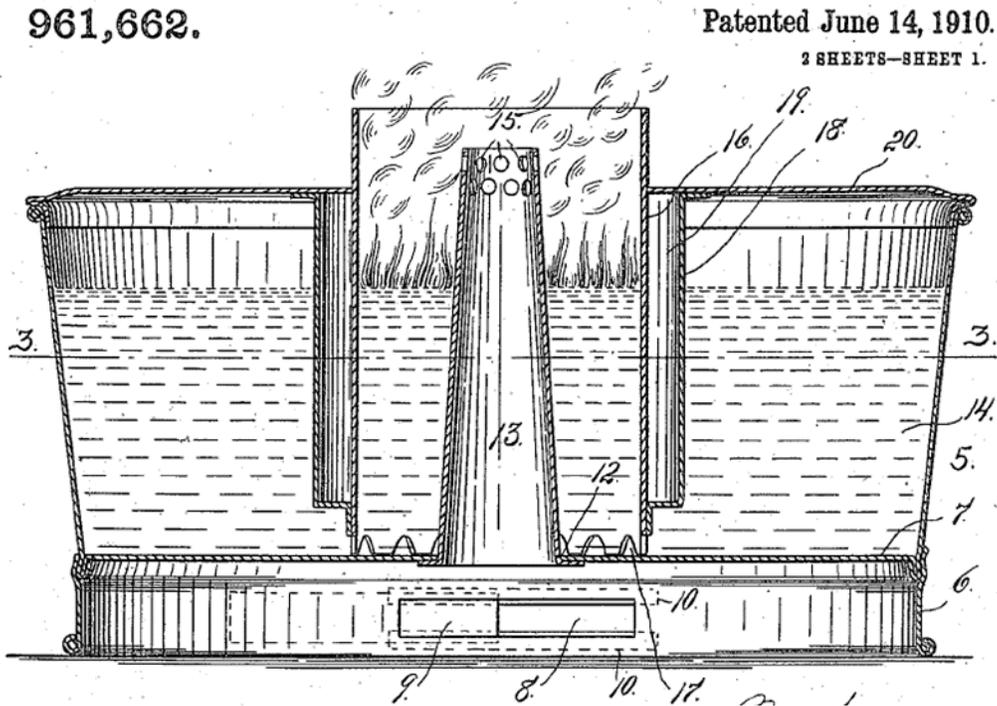
Los métodos activos son implementados en el momento en que ocurre la helada, en un esfuerzo por mitigar este fenómeno, en las huertas manzaneras, se ha experimentado colocando abanicos, el efecto de inversión térmica es inmediato si se coloca el abanico antes de 1.5 m de altura y en la dirección del viento, manteniendo la temperatura sobre el punto crítico de congelamiento en la flor (10), (11)

Otra técnica de protección activa, se basa en la aspersión de agua por debajo del dosel, apoyándose en la liberación de calor causada por la formación forzada de una capa de hielo sobre la superficie del suelo, esto modifica fuertemente la estructura del balance de energía en la superficie, provocando que los nuevos brotes permanezcan a cero grados Celsius (5), (12), (13)

Pero el método más comúnmente implementado es el uso de calentones operados con algún tipo de combustible fósil, pudiendo representar un gran costo ambiental y económico, su operación.

### 1.1.4 Patentes de dispositivos usados para la protección contra heladas

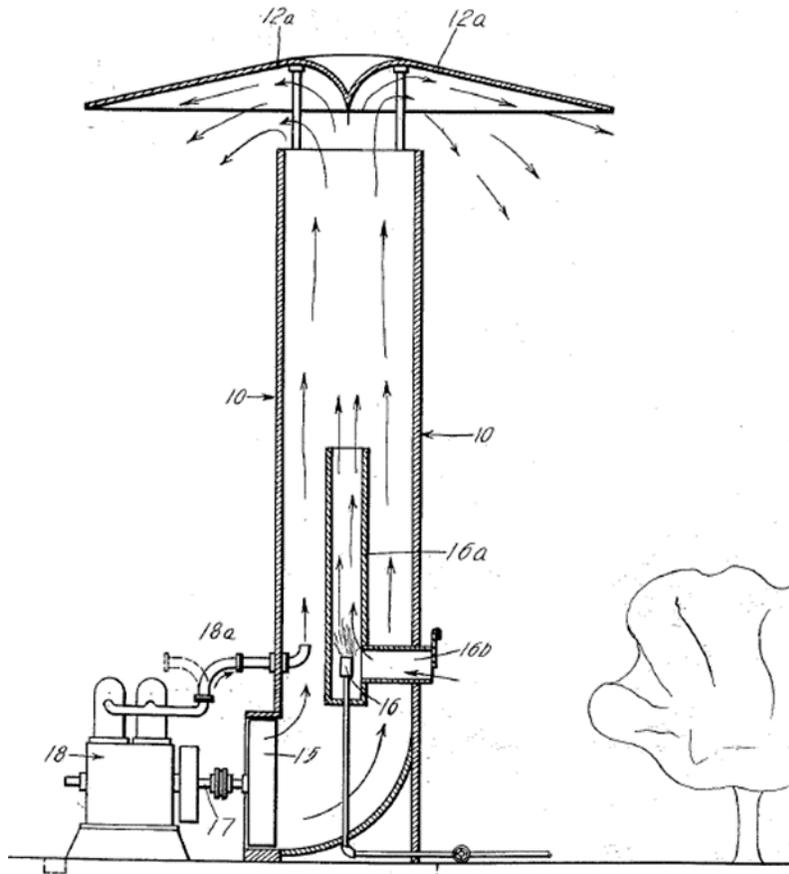
A lo largo de la historia se han patentado una gran cantidad de dispositivos para mitigar las heladas tardías, se cuenta con registros desde 1910 cuando P.H. Troutman invento un reservorio de combustible líquido, alimentando una cámara de combustión situada en el centro de este reservorio, (Fig. 1) (14).



**Figura 1 Orchard Heating Device**

En 1914 J.L. Carder, patento un sistema de suministro de aire caliente a cada árbol en una huerta, el cual consta de un quemador y un compresor de aire, conectado a una serie de tuberías distribuidas por toda la huerta, (15).

El primer abanico diseñado para proteger huertas de los daños climáticos, fue patentado en 1920 por E.S.Cobb, (Fig. 2) (16).



**Figura 2 Process of preventing frosts or heat injury in orchards**

Un abanico muy similar a los que se usan en las huertas actualmente, fue patentado en 1921 por L.J. Whitlock, (Fig. 3), este tipo de dispositivos se colocan en una torre, generalmente en el centro de la huerta, y su objetivo es crear una turbulencia para mezclar las capas de aire, evitando de esta manera que el frio dañe la siembra (17).

En 1992 Ernest W. Christopherson patentó un calentón para huertas usando pellets de biomasa como combustible, el cual consta de un depósito de pellets, una caldera y una chimenea rodeada de aletas, (Fig. 4) (18).

1,398,927.

Patented Nov. 29, 1921.

2 SHEETS-SHEET 2.

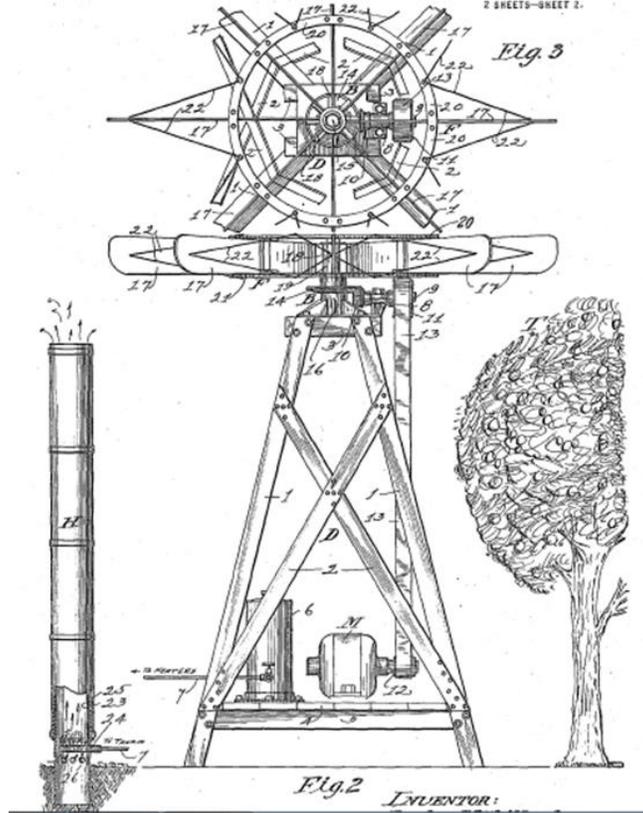


Figura 3 Temperature Moderator for Orchards and the like

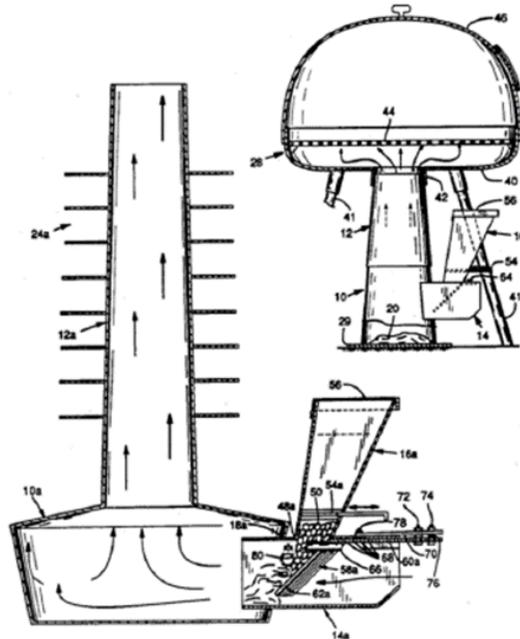
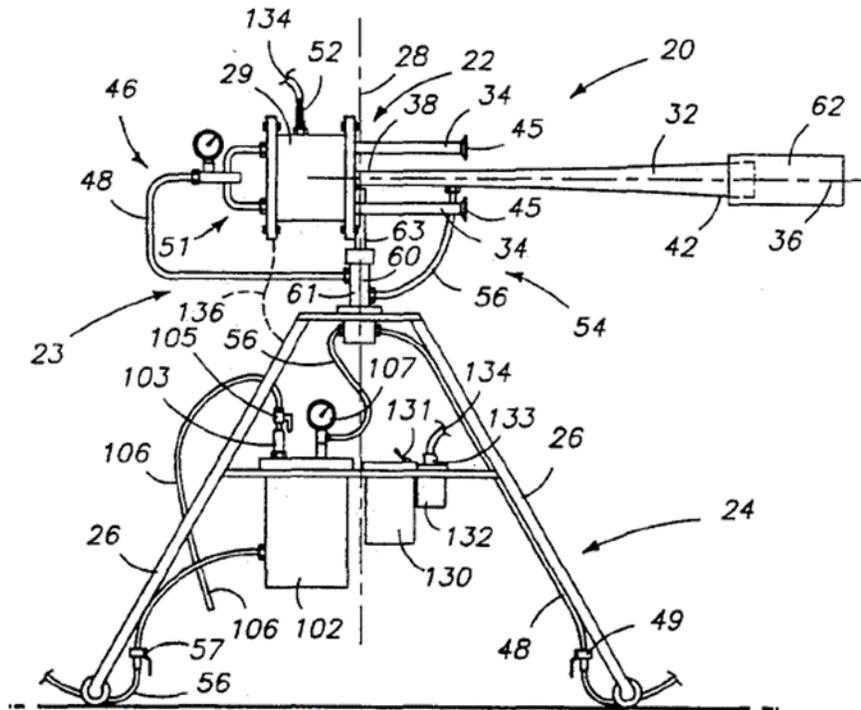


Figura 4 Biomass Pellet-Burning Orchard Heaters

Un método muy eficiente para mitigar las heladas en las siembras, es la aspersión de agua, un dispositivo de este tipo fue patentado en 1994 por Stanislaw Pullman (19) (Fig.5).



**Figura 5 Aerosol Generating Rotary Pulse-Jet Orchard Heater**

## 1.2. GENERALIDADES EN LAS HUERTAS MANZANERAS

Se calcula que en el estado de Chihuahua existen alrededor de 2,500 productores de manzana, de los cuales el 25% son grandes productores, 50% medianos y 25% pequeños. El principal destino de la producción nacional de manzana es para consumo en fresco (70%) y el resto para la industria (30%), para la elaboración de jugos y nectáreas. La actividad manzanera del estado genera alrededor de 3.5 millones de jornales anuales.

Como se mencionó anteriormente, el estado de Chihuahua es el principal productor de manzana en México. Las condiciones climáticas y de suelo le permiten obtener los más altos rendimientos. Las variedades cultivadas en la entidad son la Golden Delicious, Red Delicious y Rome Beauty, aunque también se tiene registro de producción de otras variedades sin clasificar.

Así mismo, el estado de Chihuahua tiene los rendimientos más altos (15.8 ton/ha) en 2007, la mayor superficie cultivada (42%) y por tanto aporta el mayor porcentaje de valor al producto interno bruto de los estados productores de México. El mayor costo de producción lo constituye la contratación de mano de obra, seguido del consumo de combustibles (diésel y gasolina) y lubricantes. (20)

### 1.2.1. Distribución en una huerta manzanera

Los árboles en el área de las huertas, están distribuidos uniformemente, lo común es que se encuentren a 2 m de distancia entre filas y a 4 m de distancia entre calle y calle, como se muestra en la figura 6. La altura de los árboles varía de 2 a 6 m dependiendo de varios factores como la clase de manzano, la edad del árbol, la poda o las estrategias de producción del fruticultor.

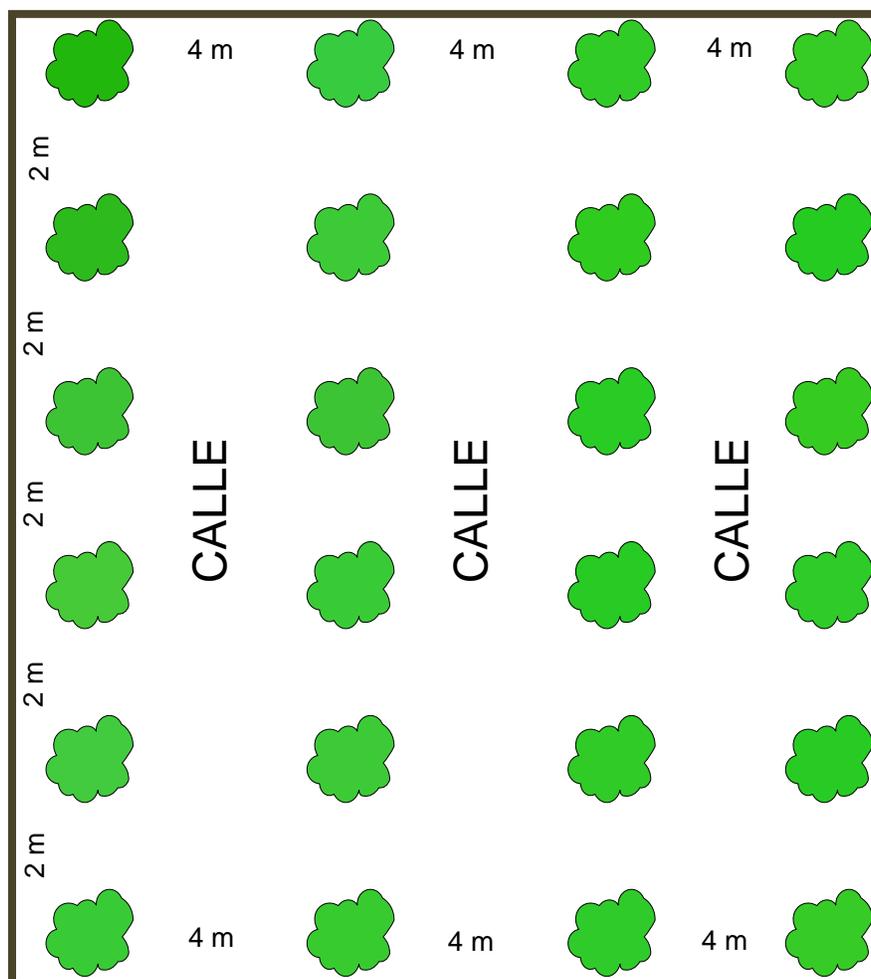


Figura 6 Distribución de los árboles en una Huerta Manzanera

### 1.2.2. Acondicionamiento de aire

A lo largo de la historia, los agricultores de todas partes del planeta se han enfrentado a la problemática que representan las inclemencias climáticas, si bien el manzano es un árbol de clima frío que necesita una temperatura promedio anual de aproximadamente 10°C, en los meses de marzo, abril y principios de mayo, cuando están floreciendo, no soportan las heladas tardías que se pueden presentar, la flor se congela a -1.5°C y por lo tanto se pierde la cosecha. Para mitigar este fenómeno, lo común en Chihuahua es colocar calentones en el perímetro de la huerta y en medio de cada cuatro árboles (Fig.7) esperando proporcionar el calor suficiente a la flor y/o al nuevo brote a fin de salvar la cosecha anual (Fig. 8).

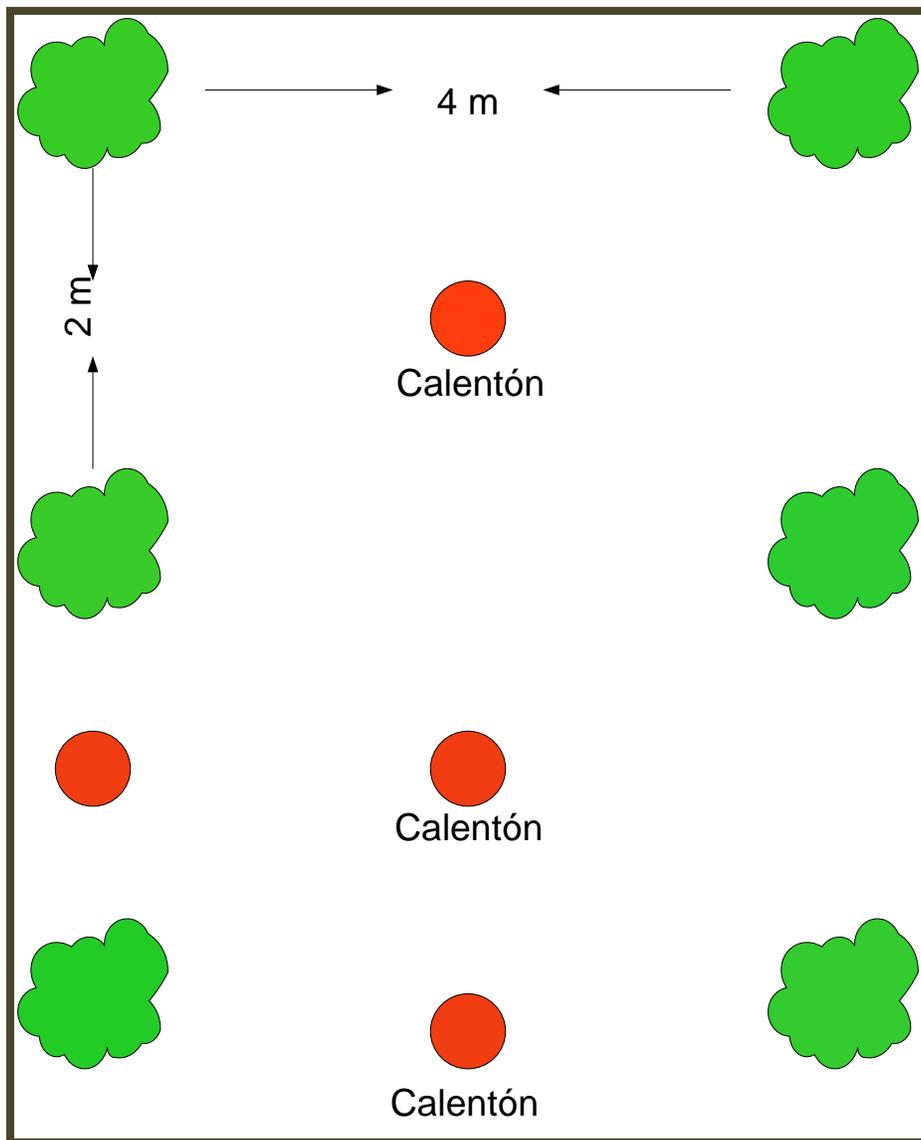


Figura 7 Distribución de Calentones en una Huerta Manzanera



Figura 8 Calentones usados en huertas

### **1.3. OBJETIVO**

#### **Objetivo General**

Diseñar y construir un calentón para huertas manzaneras, alimentado con pellets de aserrín.

#### **Objetivos Específicos**

- a) Por medio de experimentación, analizar la distribución del calor generado por un calentón principalmente convectivo instalado en una huerta manzanera. Este análisis servirá como punto de partida para el diseño de un calentón usando pellets de aserrín como combustible
- b) Caracterización del fenómeno de la helada, por medio de un balance de energía en el nuevo brote en un manzano.
- c) Diseño de un calentón para huertas manzaneras usando pellets de aserrín como combustible, cuyo principal mecanismo de transferencia de calor sea la radiación.
- d) Construcción de un calentón para huertas manzaneras usando pellets de aserrín como combustible, cuyo principal mecanismo de transferencia de calor sea la radiación.
- e) Experimentación: transferencia de calor por radiación
- f) Medición de las emisiones generadas por la combustión de pellets de aserrín comparada con las emisiones generadas por la combustión de aceite residual comúnmente usado en las huertas manzaneras.

#### **1.4. HIPOTESIS**

Es posible diseñar, desarrollar y construir, un calentón para huertas manzaneras, que use pellets de aserrín como combustible, que sea eficiente, económico y amigable con el ambiente.

## II METODOLOGIA

### 2.1 Transferencia de calor por convección

Para conocer experimentalmente la distribución del calor generado por un calentón principalmente convectivo funcionando al aire libre, se utilizaron dos mallas (o redes) colocadas a 90° entre ellas y el calentón de geometría hexagonal operado con gas como combustible, se ubicó en medio de estas, cada malla soporta 40 termopares distribuidos en un área de 4m de ancho por 5.16m de alto, permitiendo registrar el gradiente de temperatura próxima al calentón. El experimento se llevó a cabo durante dos noches en una huerta manzanera ubicada en el km 16 de la carretera Cuauhtémoc-Rubio en Chihuahua México ( $28^{\circ}43'379''N$  y  $106^{\circ}54'637''W$ ).

Las dos mallas se construyeron usando cable de acero galvanizado calibre 3/16, cada una formada por cinco columnas de 0.80m de ancho y seis filas de 0.86m de alto (Fig. 9); una vez construidas las mallas, se colocó un termopar tipo J en cada nodo, cada termopar se conectó a un adquisidor de datos (Agilent/HP34970A Data logger), de tal manera que fuera posible obtener la medición de temperatura en 80 puntos distintos en un instante dado.

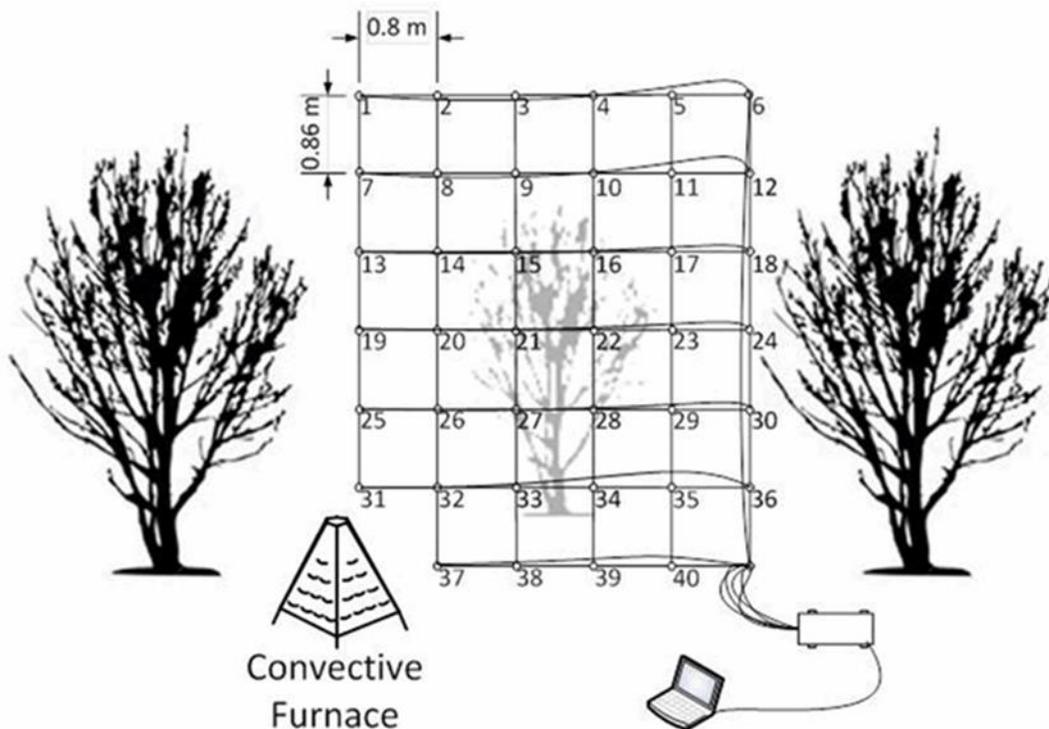
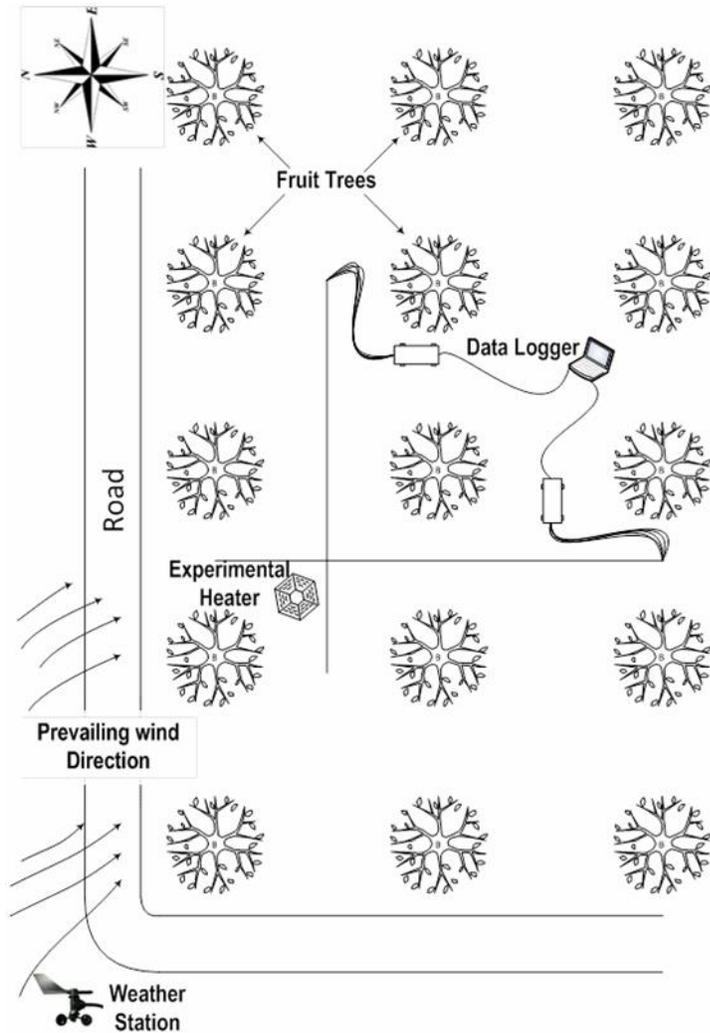


Figura 9 Esquema de malla con termopares

Las mallas se sostuvieron en posición vertical, por medio de mástiles anclados en el suelo, se colocó una malla de norte a sur y la otra malla de este a oeste, de tal manera que formaban un ángulo de 90° y se colocó el calentón en el punto de intersección de estas. También se instaló en el perímetro de la huerta, una estación meteorológica modelo Davis Ventage Pro2 Wireless Weather Station, registrando la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento así como la humedad relativa (Fig. 10).



**Figura 10 Vista aérea de las mallas colocadas en la huerta manzanera**

## 2.2. Balance de energía en el nuevo brote

Durante una noche de helada, el nuevo brote sufre pérdida de calor, principalmente por radiación hacia el cielo ( $Q_{\text{rad flor}}$ ) y por convección ( $Q_{\text{conv}}$ ) puede tener pérdida o ganancia dependiendo de la velocidad del viento. Para mantener el nuevo brote a salvo (sobre  $0^{\circ}\text{C}$ ) es necesario proporcionarle por lo menos el mismo calor que está perdiendo durante la helada. Este calor se proveerá por medio de un calentón principalmente radiativo ( $Q_{\text{rad cal}}$ ) usando pellets como combustible (Fig.11).

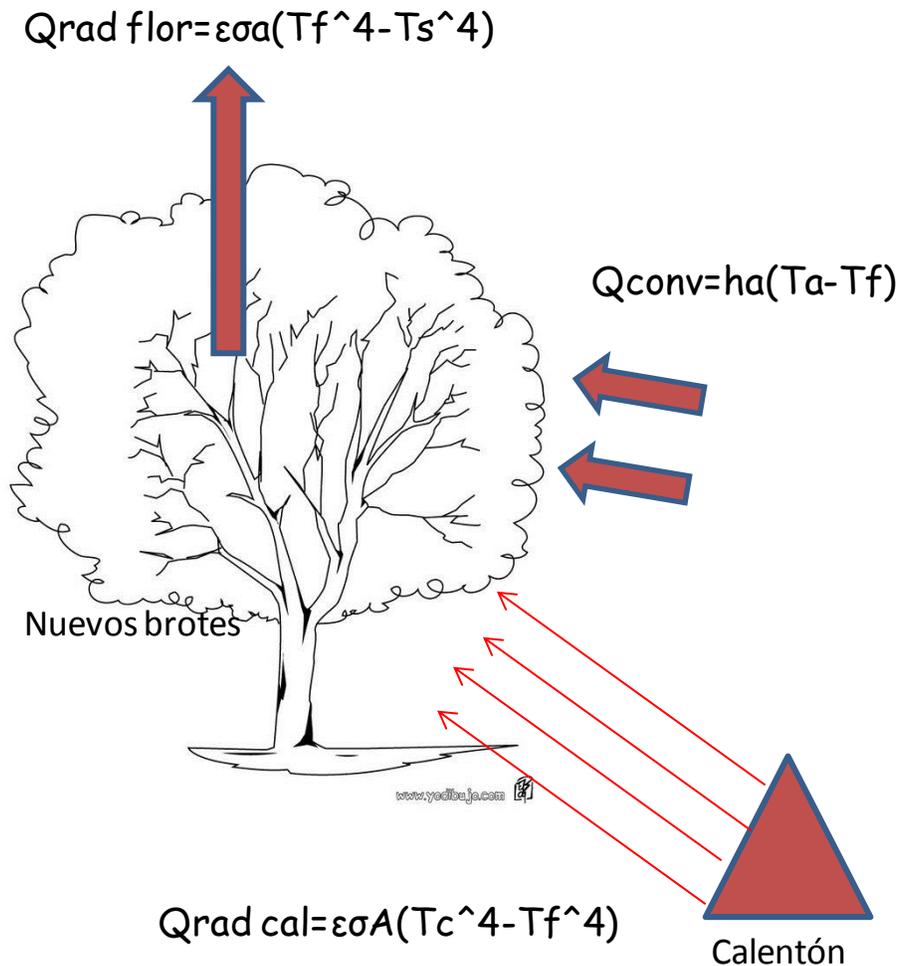


Figura 11 Análisis de la Pérdida de Calor

Donde:

$\varepsilon$  =emisividad

$\sigma$ =cte Stefan Boltzman

Tf=temperatura flor

Ts=temperatura cielo

h=coeficiente convectivo

a=área flor

Ta=temperatura ambiente

A=área calentón

Tc=temperatura calentón

$$\varepsilon\sigma A(Tc^4 - Tf^4) + ha(Ta - Tf) = \varepsilon\sigma a(Tf^4 - Ts^4) \quad (1)$$

Calentón

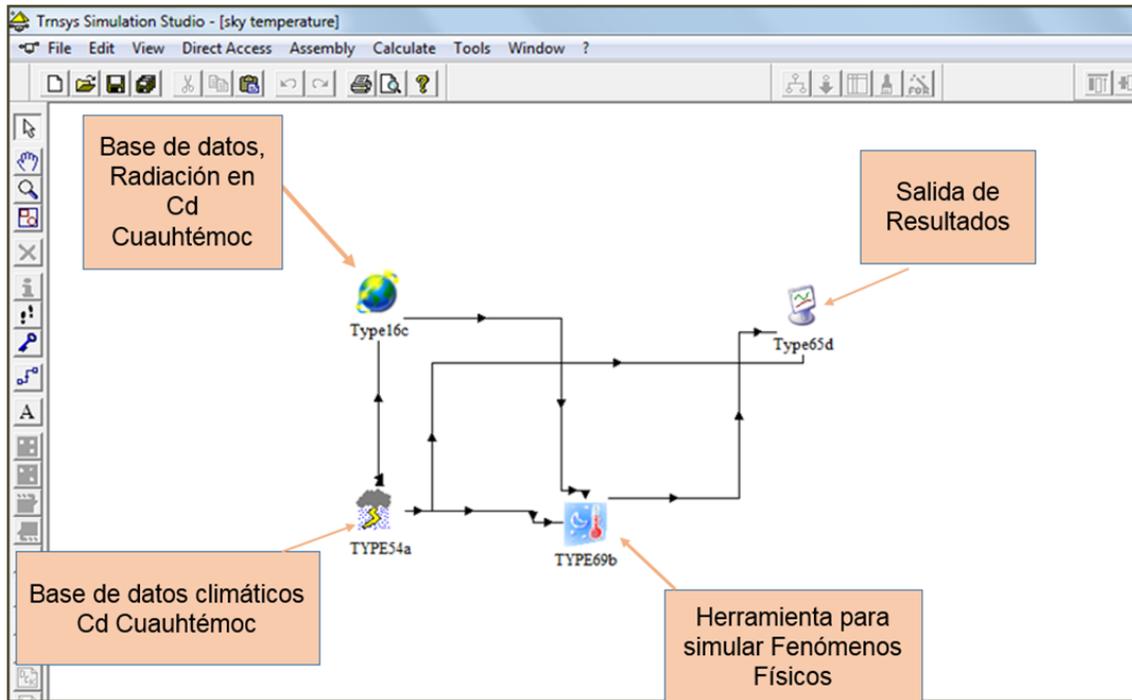
Convección

Nuevo brote

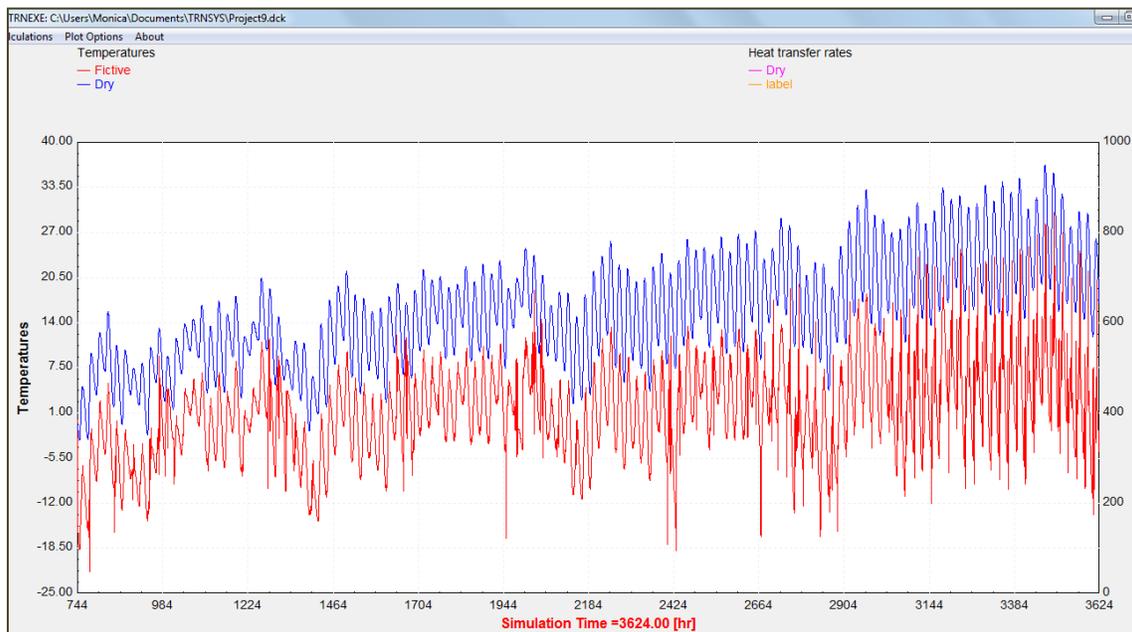
Desconocemos la temperatura del cielo, el coeficiente convectivo de transferencia de calor, la temperatura del calentón y el área que debe tener el calentón para asegurar confort en el nuevo brote.

### **2.2.1. Calculo de la temperatura del cielo**

Para conocer la temperatura del cielo, se usó el software transient system simulation TRNSYS (Fig.12), donde por medio de la base de datos climáticos de Cd Cuauhtémoc y la herramienta fenómenos físicos, fue posible concluir que en promedio la temperatura del cielo, es 25°C menor que la temperatura ambiente (Fig.13).



**Figura 12 Temperatura del Cielo TRNSYS**



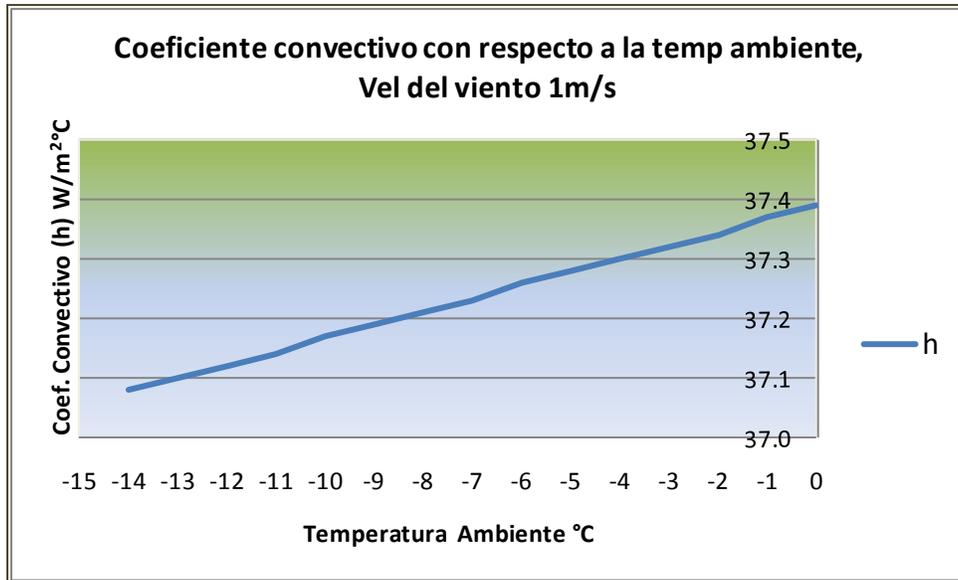
**Figura 13 Diferencia entre la temperatura del cielo y la Temperatura Ambiente**

## 2.2.2 Cálculo del coeficiente convectivo

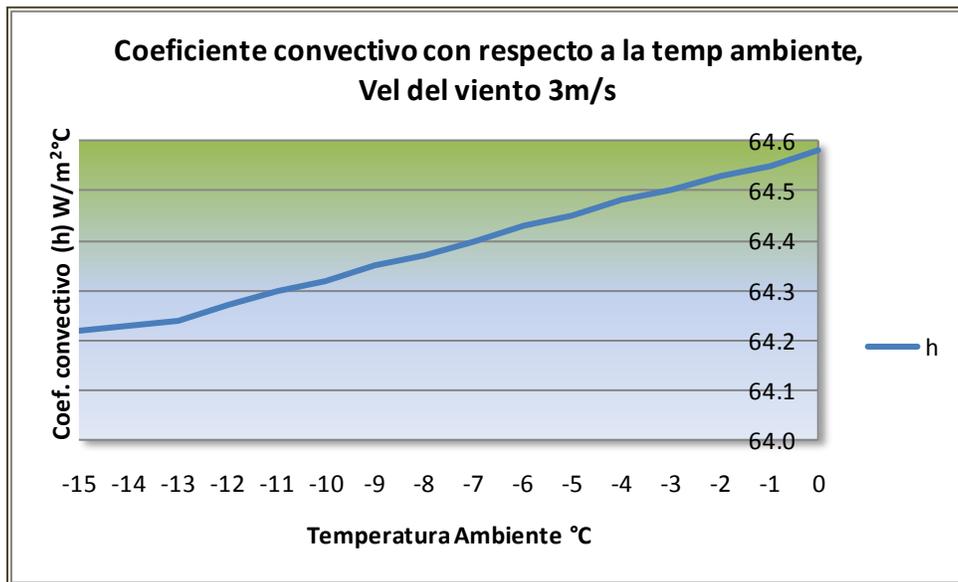
El coeficiente convectivo de transferencia de calor, se calculó en EES (Engineering Equation Solver) por medio del número de Nusselt, asumiendo que el nuevo brote es una esfera (Zukauskas Ref.4 y Jakob Ref.6. Transferencia de Calor, Cengel), (Fig.14). Se varió la temperatura ambiente de 0 a -14°C y la velocidad del viento de 0 a 5 m/s, los resultados muestran que el coeficiente convectivo varía en función de la velocidad del viento (Grafica 1). Fijando la velocidad del viento en 3m/s, es posible visualizar que no influye significativamente la temperatura ambiente en el valor del coeficiente convectivo, (Grafica 2).

```
EES Professional: C:\Users\Monica\Desktop\calculo de h.EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
"Calculos para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección"
mu=Viscosity(Air, T=t1) "Viscosidad dinámica"
Pr=Prandtl(Air, T=t1)
k=Conductivity(Air, T=t1)
d=Density(Air, T=t1, P=101)
v=mu/d "Viscosidad cinemática"
Di=0.02[m]
Re=(Vel*Di)/v
Nu=2+((0.4*(Re^0.5)+0.06*(Re^0.66))*(Pr^0.4)*(mu/0.00001729)^0.25) "Transferencia de Calor, C"
h=(k/Di)*Nu
```

Figura 14 Cálculo del Coeficiente Convectivo EES



**Grafica 1 Coeficiente convectivo (h) variando la temperatura ambiente de 0 a -14°C**

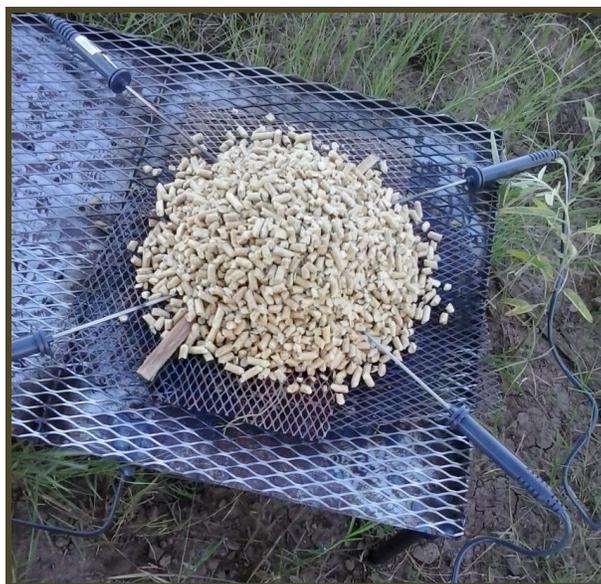


**Grafica 2 Coeficiente convectivo (h), con una velocidad del viento de 3m/s**

### 2.2.3 Temperatura de combustión

La temperatura de combustión se determinó quemando 1kg de pellets de aserrín, al aire libre y sin ningún control:

- Se colocaron los pellets de aserrín sobre una parrilla (Fig. 15).
- Se introdujeron 4 termopares tipo K, (conectados a dos adquisidores de datos marca FLUKE) en distintos puntos dentro de los pellets.
- Se inició la ignición por medio de una varita de ocote (Fig. 16).



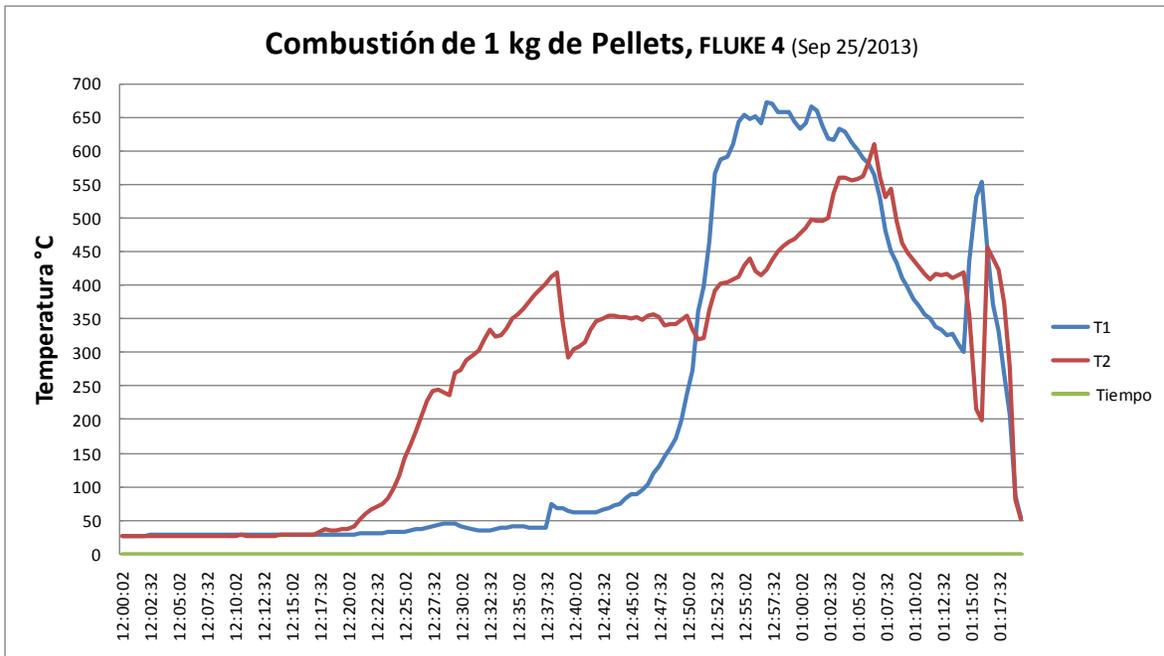
**Figura 15 Preparando para experimentar con el quemado de pellets**



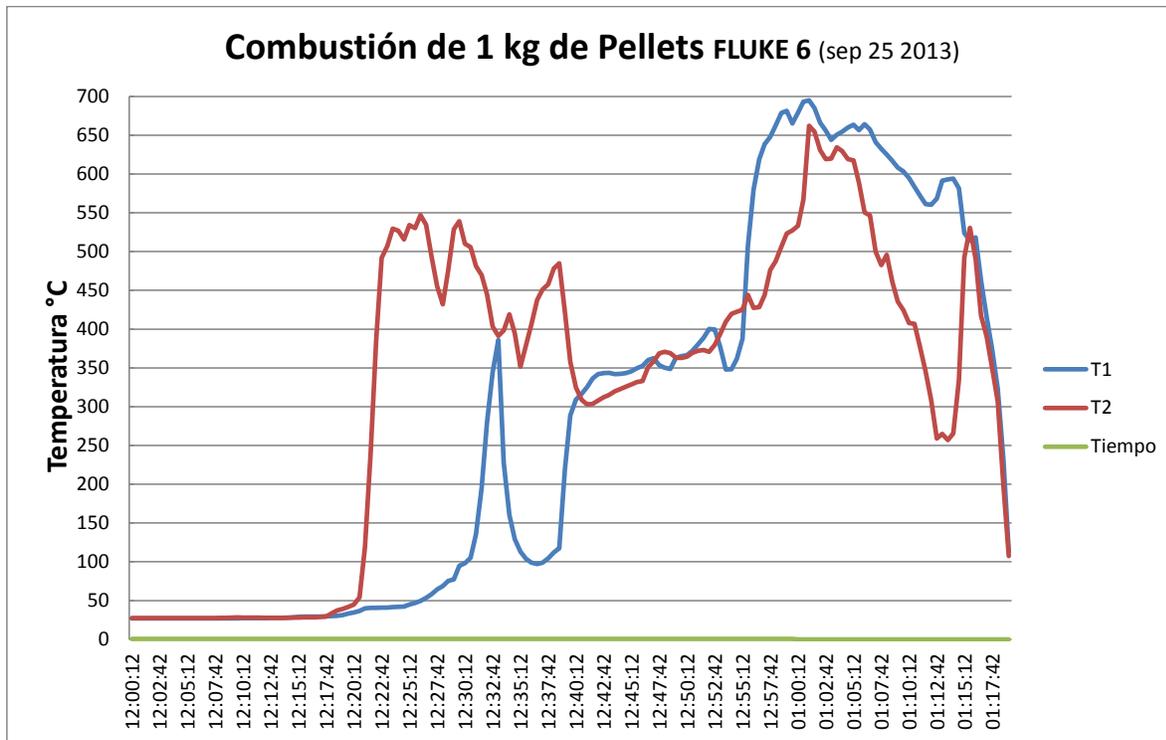
**Figura 16 Combustión de Pellets**

Los resultados de la experimentación, muestran que la combustión de Pellets al aire libre alcanza una temperatura máxima de casi 700°C (Graficas 3 y 4). Este valor se toma solo como referencia, ya que es necesario medir las emisiones, para conocer las condiciones en las que se está llevando a cabo la combustión.

Una vez iniciada la ignición, el fuego se propaga lentamente de pellet a pellet de una manera envolvente, hasta que ya no hay pellets sin quemar, si las brasas son alimentadas con más pellets, estos encienden rápidamente, de tal manera que es posible asumir la factibilidad de mantener una flama constante



**Grafica 3 Combustión de Pellets FLUKE 4**



**Grafica 4 Combustión de Pellets FLUKE 6**

### 2.3. Calculo del área radiante

Sustituyendo valores en la ecuación antes descrita (1), se calculó la pérdida de calor en el brote durante un evento congelante usando la temperatura mínima esperada en la región de Cd. Cuauhtémoc Chihuahua (-14°C). Introduciendo las ecuaciones 2-4 (21) en Excel, se modela el área radiante que debe tener el calentón así como el ángulo de inclinación para proporcionar confort térmico a los nuevos brotes dentro de la huerta manzanera. Estos resultados se validaron en el software COMSOL multiphysics.

$$\omega = \frac{A_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (2)$$

Donde:

$\omega$  = ángulo sólido del nuevo brote visto desde el calentón

$A_2$  = área del nuevo brote (diámetro = 1 cm)

$\theta_2$  = posición del nuevo brote con respecto al calentón

$r$  = radio, considerando al nuevo brote con forma casi esférica

$$I: \frac{\sigma T_1^4}{\pi} \quad (3)$$

Donde:

$I$ : Intensidad de la radiación emitida por el calentón

$T_1$ : Temperatura del calentón

$\pi$  : Constante  $\pi$  (3.1416)

$$A_1 = \frac{Q}{I \omega \cos \theta_1} \quad (4)$$

Donde:

$Q$  = Calor perdido por la planta [ $\epsilon \sigma a (T_f^4 - T_s^4)$ ]

$A_1$  = Área del calentón

$\theta_1$  = ángulo de inclinación de la placa radiante

### 2.3.1 COMSOL multiphysics

Es un software para el modelado de sistemas físicos basándose en el FEM (método de elemento finito). Este software facilita los pasos en el proceso de modelado, mediante una interfaz que permite obtener una solución a través de la combinación de distintos fenómenos físicos. El proceso que se lleva a cabo para realizar un modelado con ayuda de COMSOL Multiphysics se define a través de los siguientes pasos: la creación de una geometría, la creación de una malla, la especificación de una física(s), la elección del tipo de solución y la visualización de los resultados (22).

El software se caracteriza por estar dividido en módulos, definidos en base al tipo de análisis que se pretenda realizar, incluyendo el módulo “Heat Transfer Module” capaz de simular transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

Recientemente se han publicado trabajos de simulación que hacen uso de este módulo, como ejemplo Suarez *et al.* y Zeng *et al.* (23), (24). Usaron el software para simular transferencia de calor por medio de radiación electromagnética, obteniendo resultados que coinciden con los encontrados experimentalmente.

Wondwosen *et al.* (25) Simularon convección forzada; Cogné *et al.*, Prasad *et al.* Y Tseranis *et al.* (26), (27), (28) Han simulado en COMSOL almacenamiento de calor y transferencia de calor y masa, por mencionar solo algunos trabajos desarrollados por medio de este software.

### Simulación de la radiación emitida por una placa radiante

La simulación se realizó en la versión 4.3b de COMSOL, variando el área de la placa radiante así como los grados de inclinación y la distancia entre la placa y los brotes o flores a los que se desea llegue la radiación. Las especificaciones del modelo se introducen en el software siguiendo los pasos descritos a continuación:

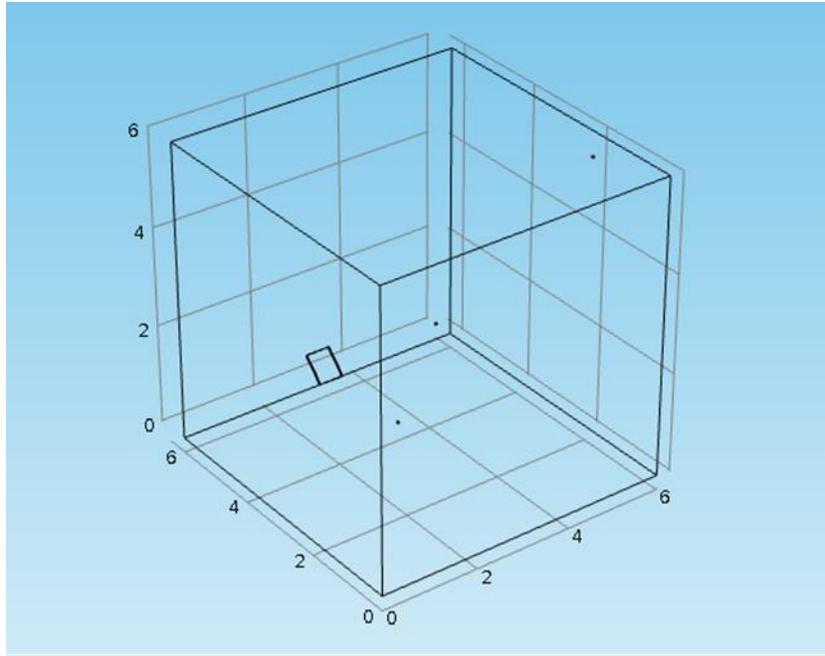
**Model Wizard:** En el asistente de modelo, se especifica que se desea trabajar en 3D, se elige la física Heat Transfer>Radiation>Radiation in Participating Media (rpm). En estado estacionario.

**Global Definitions:** En el model builder, se construye el modelo, introduciendo los parámetros globales del sistema (tabla 1). (Los datos de emisividad son tomados del libro de transferencia de calor de Cengel (21))

**Tabla 1 Parametros globales**

Name	Expression	Description
T_cal	973.15[K]	Temperatura calentón
em_cal	0.8	Emisividad pellets
em_brote	0.9	Emisividad brote
T_aire	258.15[K]	Temperatura aire
U0	1[m/s]	Velocidad aire
P_total	18000000[W]	Poder total emitido x el cal
scattc	0[1/m]	Coefficiente de scattering
<b>Geometría</b>		
L_channe1	6[m]	Longitud Vol de control
W_channe1	6[m]	Ancho VC
H_channe1	6[m]	Alto VC
L_cal	0.6[m]	Longitud calentón
H_cal	0.5[m]	Alto calentón
W_cal	0.05[m]	Grosor calentón
R_brote	0.025[m]	Radio brote
L_brote1	2[m]	Longitud brote1-cal
H_brote1	6[m]	Alto brote1-cal
L_brote2	2.5[m]	Long brote2-cal
H_brote2	3[m]	Alto brote2-cal
L_brote3	2.25[m]	Long brote3-cal
H_brote3	1.5[m]	Alto brote3-cal

**Geometría:** Se construye la geometría por medio del botón Wireframe Rendering localizado en la barra de herramientas del gráfico, este será el volumen de control. Enseguida se construye la geometría de la placa radiante y del nuevo brote, dentro del volumen de control, adicionando propiedades termodinámicas a cada superficie (21) Fig.17.



**Figura 17 Geometría (volumen de control-placa radiante-brote o flor)**

La ecuación de transferencia de calor radiativa (RTE), es resuelta por el software para un total de 24 direcciones (S4) las cuales cubren el rango total del ángulo sólido alrededor del calentón.

La RTE el software la escribe de la siguiente forma:

$$\Omega \cdot \nabla I(\Omega, s) = \kappa I_b(T) - \beta I(\Omega, s) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\Omega, \Omega') \phi(\Omega, \Omega') \partial \Omega'$$

Donde:

- $I(\Omega, \sigma)$  es la intensidad radiativa en la posición  $s$  dada, siguiendo  $\Omega$  direcciones.
- $T$  es la temperatura
- $K, \beta, \sigma_s$  son los coeficientes de absorción, extinción y dispersión respectivamente.
- $I_b(T)$  es la intensidad radiativa de cuerpo negro
- $\Phi(\Omega, \Omega') = 1 + \alpha \mu_0$  y  $\mu_0 = \Omega \cdot \Omega'$  ( $\Omega'$  es el coseno del ángulo de dispersión).

## **2.4 Construcción de Prototipo**

Con los resultados obtenidos en el punto anterior, se construye el prototipo de calentón, usando los siguientes materiales:

Metal desplegable

Angulo de 1" x 1/8"

Lamina acero al carbón C20

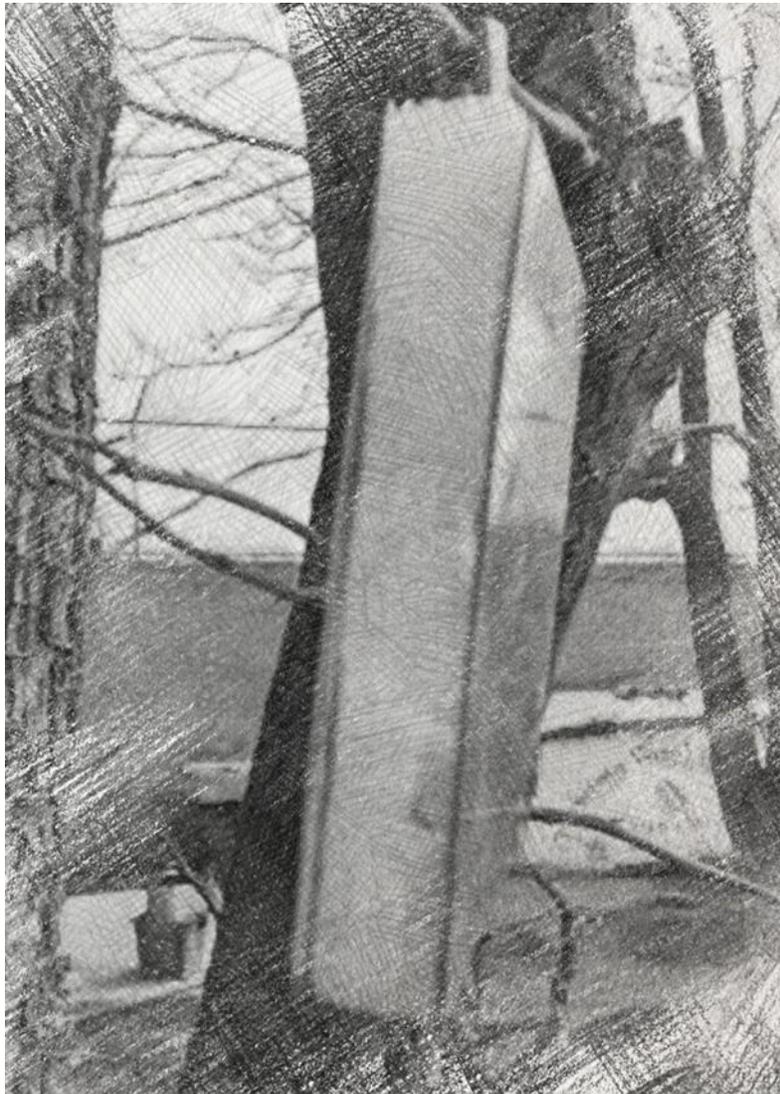
Varilla redonda pulida de 1/4"

Perfil 109 C18

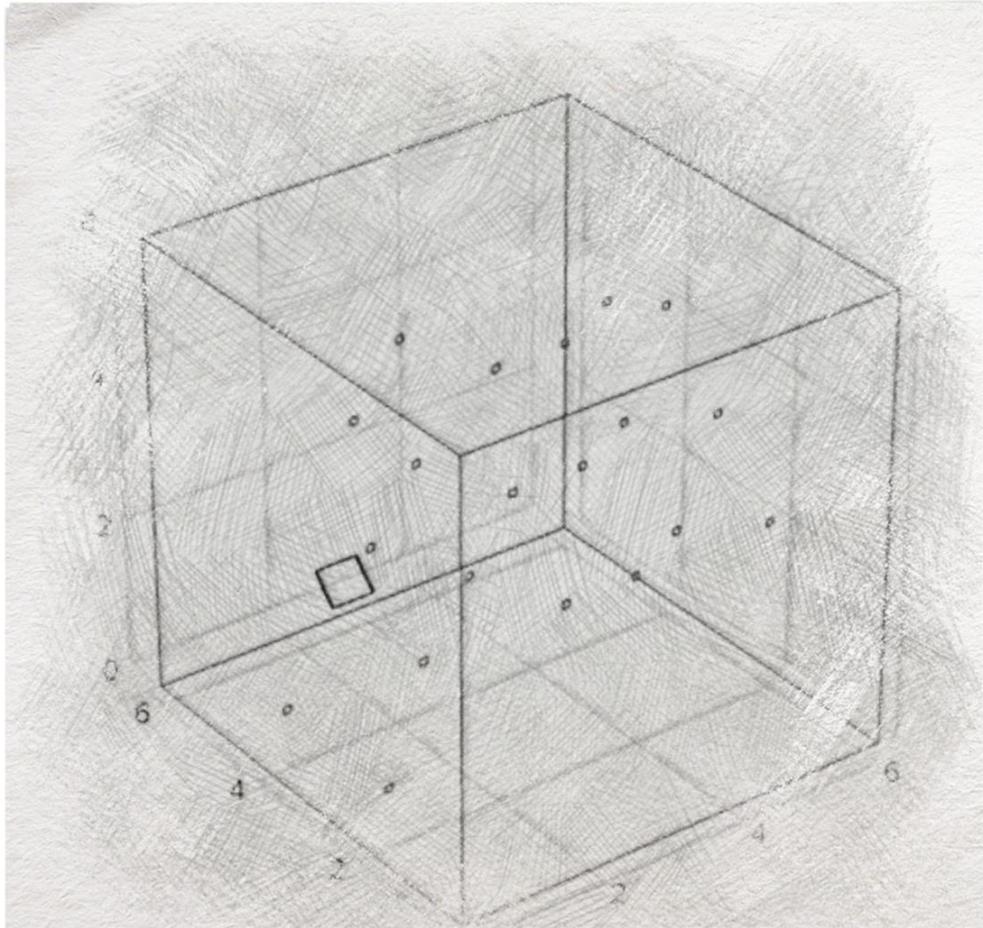
Soldadura de micro alambre

## 2.5 Transferencia de calor por radiación

Para medir experimentalmente el gradiente de temperatura producto de la radiación emitida por la placa radiante en el calentón propuesto, se elaboraron 20 pares de placas de lámina de 10cm por 10cm de longitud unido cada par por medio de poli estireno expandido (para evitar la conducción de calor entre laminas) formando un "sándwich" (Fig.18) se colocó un termopar tipo T en cada una de las láminas, una cara recibiendo radiación y la otra cara detrás de esta, de tal manera que sea posible comparar la temperatura en el mismo punto en un instante dado. Las placas con termopares se distribuyeron calculando el ángulo sólido que describirá la superficie radiante del calentón y los termopares se conectaron a un adquiredor de datos midi LOGGER GL820 marca GRAPHTEC (Fig. 19).



**Figura 18** Placa de lámina para medir temperatura



**Figura 19 Localización de las placas con termopares**

## **2.6 Emisiones**

La contaminación atmosférica generada por los calentones operados en las huertas durante los periodos de heladas tardías, son un grave problema ambiental en Cd. Cuauhtémoc. Se espera que el calentón aquí propuesto, usando biomasa como combustible, logre mitigar esta situación.

Se midieron las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> generadas por la combustión de aceite residual de motor en un calentón principalmente convectivo comúnmente usado por los agricultores de la región manzanera, y se compararon con las emisiones generadas por la combustión de pellets de aserrín en el calentón principalmente radiativo aquí propuesto. Ambas mediciones se tomaron por medio de un medidor de emisiones marca TESTO-350.

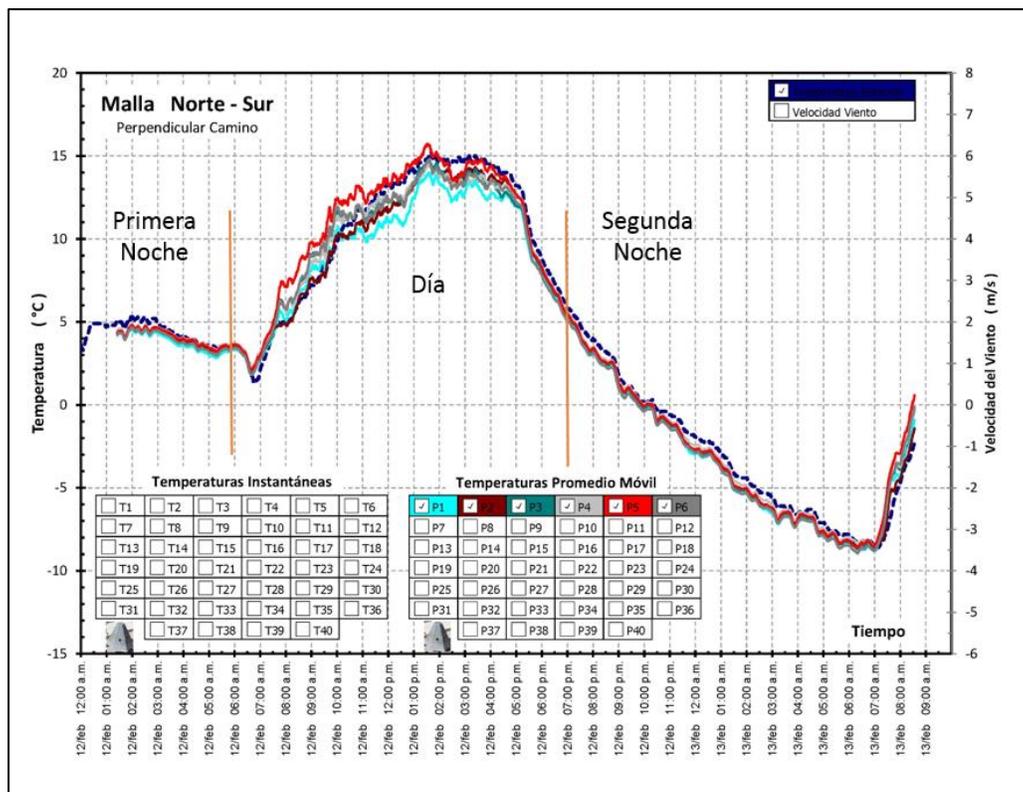
### III RESULTADOS

#### 3.1 Distribución del calor emitido por un calentón principalmente convectivo

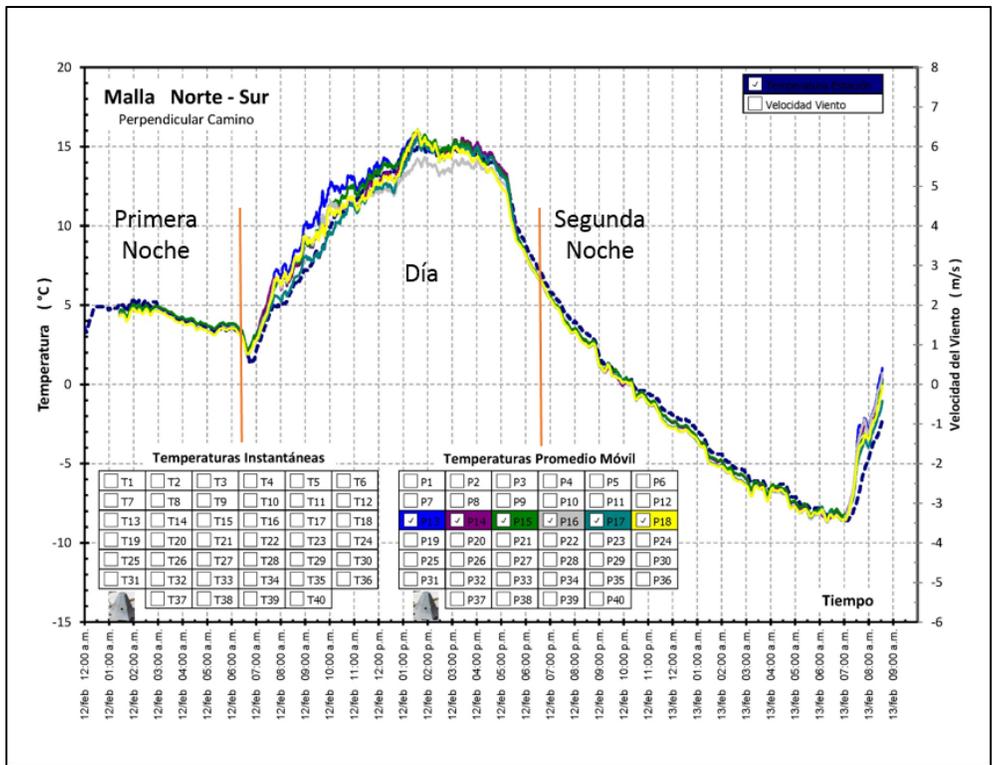
Durante la primera noche en la que se llevó a cabo la experimentación, se registró una velocidad del viento de 5–10 m/s y temperatura ambiente mínima de 1°C, los termopares localizados en las mallas muestran que el calor emitido por el calentón, se mezcla con el aire frío y no provoca ningún aumento en la temperatura (graficas 5-9).

La segunda noche, la temperatura ambiente descendió a -10°C con ausencia de viento (0-1.3 m/s) y una humedad relativa casi nula. Con estas condiciones los resultados muestran lo siguiente:

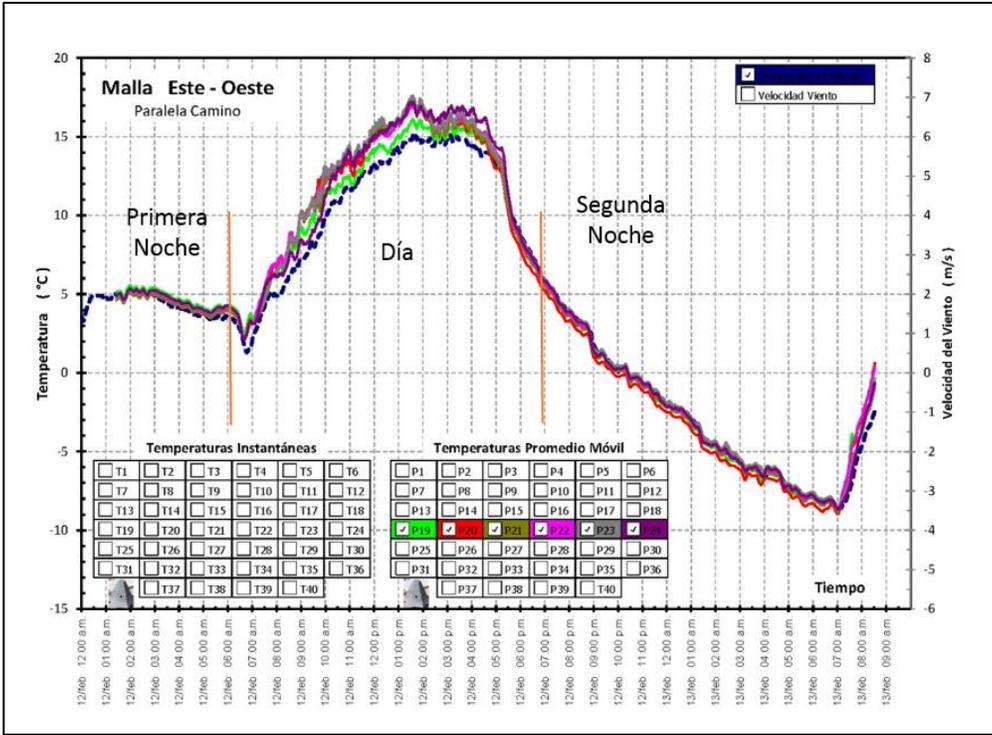
- El calor se distribuye horizontalmente y no alcanza la altura de los brotes de flor que se necesitan proteger de la helada (graficas 5-7).
- Solo los termopares más próximos al calentón (2m de distancia horizontal) alcanzan temperaturas sobre 0°C pero no de manera constante (grafica 8).
- Los termopares de la fila más cercana al suelo (50cm de altura) registran las temperaturas más bajas, debido a que el suelo pierde calor por radiación (grafica 9).



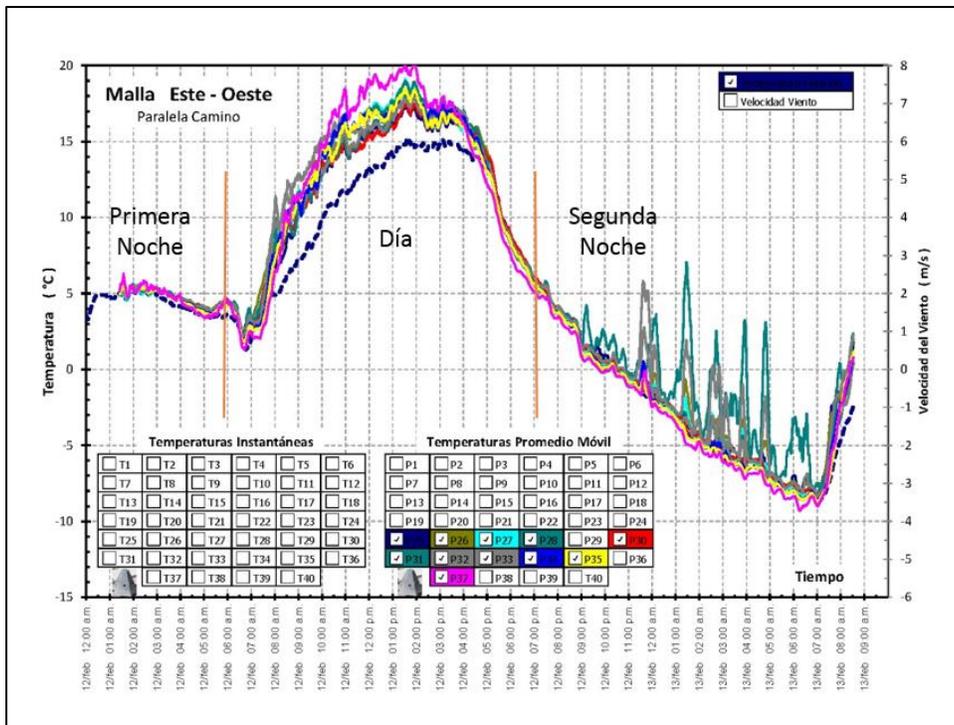
Grafica 5 Termopares ubicados a 6m de altura



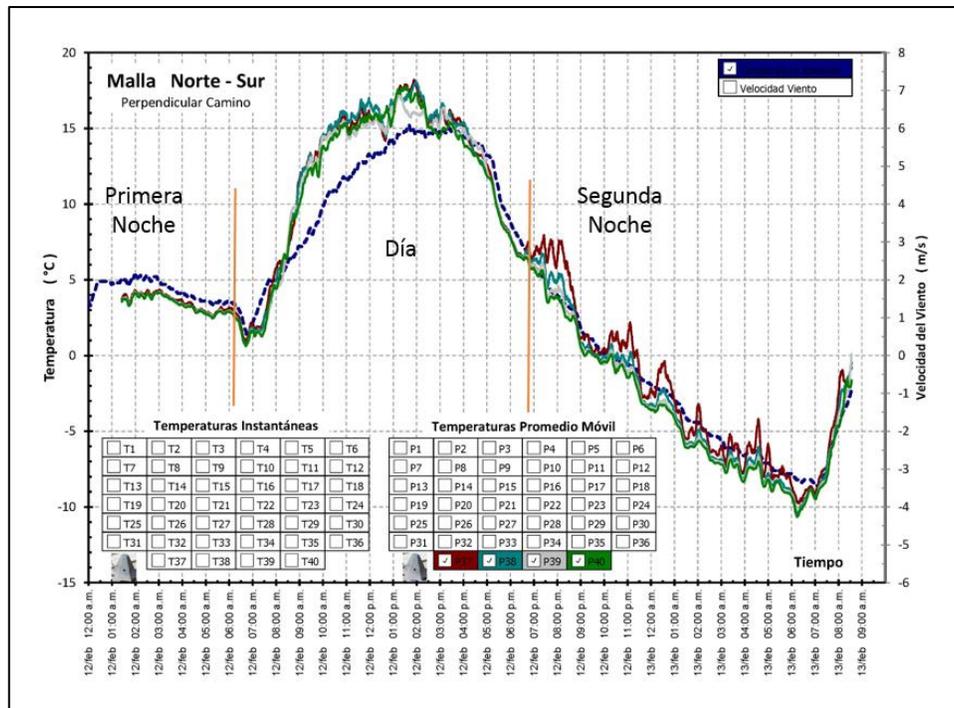
Grafica 6 Termopares localizados a 4.3m de altura



Grafica 7 Termopares localizados a 3.4m de altura



**Grafica 8 Pluma de calor (la línea punteada azul es la temperatura ambiente)**



**Grafica 9 Termopares próximos al suelo (línea punteada azul es la temperatura ambiente)**

Los termopares de la fila más cercana al suelo (grafica 9), registran las temperaturas más bajas, debido a que en las noches despejadas, el suelo se enfría rápidamente y por consiguiente pierde calor por radiación, a su vez enfría el aire que entra en contacto con él haciéndolo más frío que el que está en las capas superiores, esto provoca que la capa de aire caliente generada por el calentón quede atrapada entre las dos capas de aire frío sin poder circular, ya que la presencia de la capa de aire frío cerca del suelo le da gran estabilidad, el aire frío es más pesado, no puede ascender y no se mezcla, de tal manera que instalar un método de protección contra heladas de este tipo no ayuda en casi nada a mitigar los efectos de la helada en el caso de las huertas donde es necesario proteger la totalidad de los nuevos brotes que se encuentran localizados a diferentes alturas. Estos resultados están presentes en ambas mallas norte-sur y este-oeste, tal como si se estuvieran reflejando en un espejo.

Los calentones comúnmente usados en las huertas manzaneras en la región de Cd Cuauhtémoc usan diésel o aceite quemado como combustible, generando una gran cantidad de emisiones (Fig.20), estas forman una capa que protege a la huerta de la pérdida de calor por radiación hacia el cielo durante la noche de helada, pero esta capa de humo no se disipa durante el día, así que no permite pasar el calor del sol hacia la tierra (Fig. 21).



**Figura 20 Calentones encendidos en una huerta**



**Figura 21 Prendidas en Cd. Cuauhtémoc (Fuente: XEPL noticias)**

Las “Prendidas” como comúnmente le llaman los habitantes de Cd Cuauhtémoc al uso de calentones en las huertas, causa graves problemas ambientales y de salud en esta comunidad (Fig. 21), las asociaciones de manzaneros lo saben pero argumentan que no tienen más remedio que tratar de proteger las huertas y que los vecinos deben ser comprensivos ya que esta es la principal actividad económica de la región.

El calentón usado durante la experimentación, usa gas LP como combustible así que sus emisiones son mínimas y no se forma la capa protectora que se menciona en los párrafos anteriores, permitiendo medir el gradiente de temperaturas real que se genera al usar un calentón principalmente convectivo, al aire libre.

Queda claro que a menos que se decida sacrificar el bienestar ambiental, este tipo de calentones no es conveniente.

### 3.2 Área radiante y construcción de Prototipo

La radiación es el único mecanismo de transferencia de calor que no necesita un medio para propagarse, ya que esta puede viajar en el vacío, de tal manera que la distribución del calor generado por medio de un calentón principalmente radiativo, no se ve afectado por la velocidad ni dirección del flujo másico de aire frío pasando por la huerta, tampoco por las diferentes capas térmicas presentes en el ambiente

Los resultados obtenidos al introducir los datos propios de esta región donde se está llevando a cabo la experimentación, en el modelo propuesto, indican que el área radiante debe ser de  $0.3 \text{ m}^2$  con una inclinación de  $68^\circ$ . Con estas especificaciones se construyó un prototipo de  $0.6\text{m}$  de ancho por  $0.5\text{m}$  de alto en lámina negra calibre 20 (Fig. 22), los pellets de aserrín (biomasa) son alimentados al prototipo de calentón por medio de un deposito colocado en la parte superior y por gravedad caen en medio de dos mallas separadas entre sí por dos centímetros y es aquí donde se lleva a cabo la combustión quedando la braza que permanece en promedio 4 horas emitiendo hacia los nuevos brotes en los manzanos, al consumirse las brasas desocupan el espacio del área radiante y este espacio es llenado con nuevos pellets que caen desde el deposito (Fig.23).



**Figura 22 Prototipo de calentón usando pellets de aserrín como combustible**



**Figura 23 Prototipo de calentón encendido**

### 3.3 Transferencia de calor por radiación

La experimentación se llevó a cabo durante una noche en la primavera de 2015, registrándose una temperatura mínima de  $-2^{\circ}\text{C}$ . Los resultados muestran que el prototipo de calentón radiativo cubre un ángulo sólido de 4.5m de longitud, 3.6m de altura y 3m de ancho. El gradiente de temperatura promedio registrado por los termopares varía dependiendo de su localización dentro del ángulo sólido (tabla 2), como es de esperarse los termopares localizados en la normal de la placa radiante del calentón presentan mayores temperaturas y en la medida que se alejan la intensidad de la radiación disminuye. De los 20 termopares localizados en el experimento, solo dos quedaron fuera del ángulo sólido del calentón y por lo tanto no presentaron diferencia de temperatura entre ambas placas.

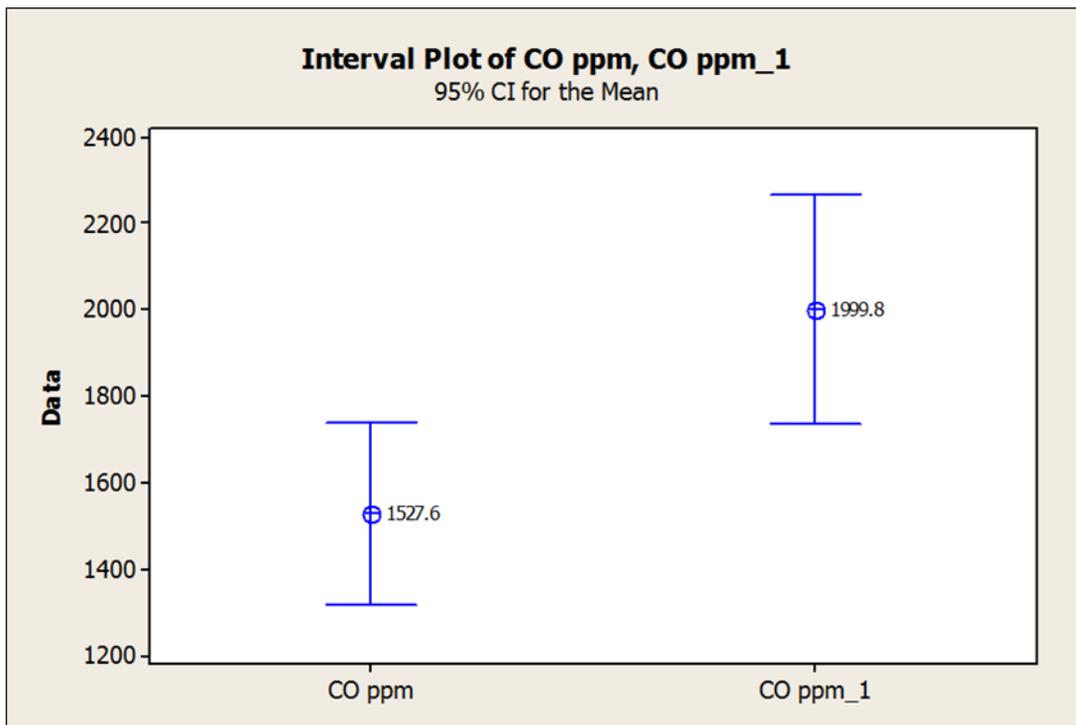
Número de Termopar	Distancia Entre el Calentón y el Termopar <b>metros</b>	Angulo entre el calentón y el Termopar <b>Grados</b>	Gradiente de Temperatura <b><math>^{\circ}\text{C}</math></b>
1	4.65	34.88	<b>3</b>
2	1.2	55.1	25
3	1.45	39.63	38
4	1.78	74.12	18
5	1.54	68.48	18
6	2.5	56.22	7
7	2.62	44.96	1
8	2.49	37.48	7
9	3.51	51.3	2
10	3.42	64.37	4
11	4.13	57.59	0
12	3.62	81.36	0
13	2.67	46.96	6
14	4.25	50.82	1
15	2.48	69.39	7
16	3.3	58.77	6
17	1.73	39.61	14
18	1.45	29.18	27
19	2.87	33.81	6
20	3.7	35.87	4

**Tabla 2 Localización de los termopares respecto a la posición del calentón radiativo**

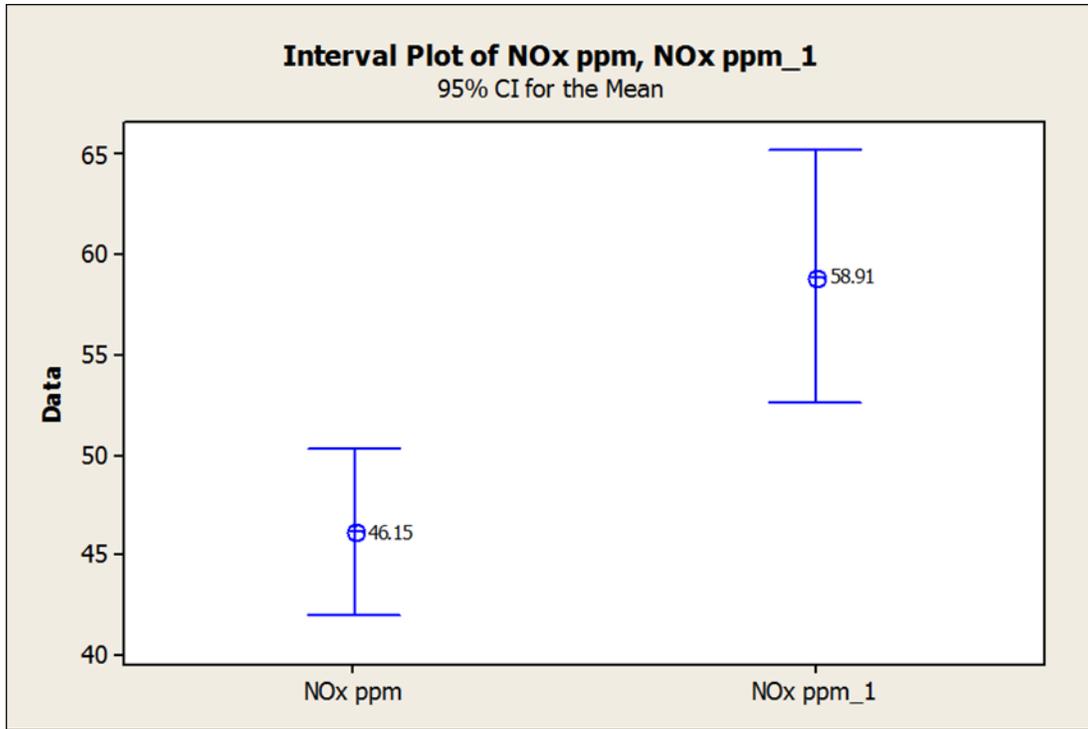
### 3.3 Comparación entre las emisiones generadas por un calentón común y el prototipo usando pellets de aserrín como combustible.

Además de proteger las siembras durante los fenómenos congelantes, es de interés común mitigar la gran contaminación atmosférica que se genera cuando los agricultores hacen uso de los calentones operados con todo tipo de combustibles fósiles.

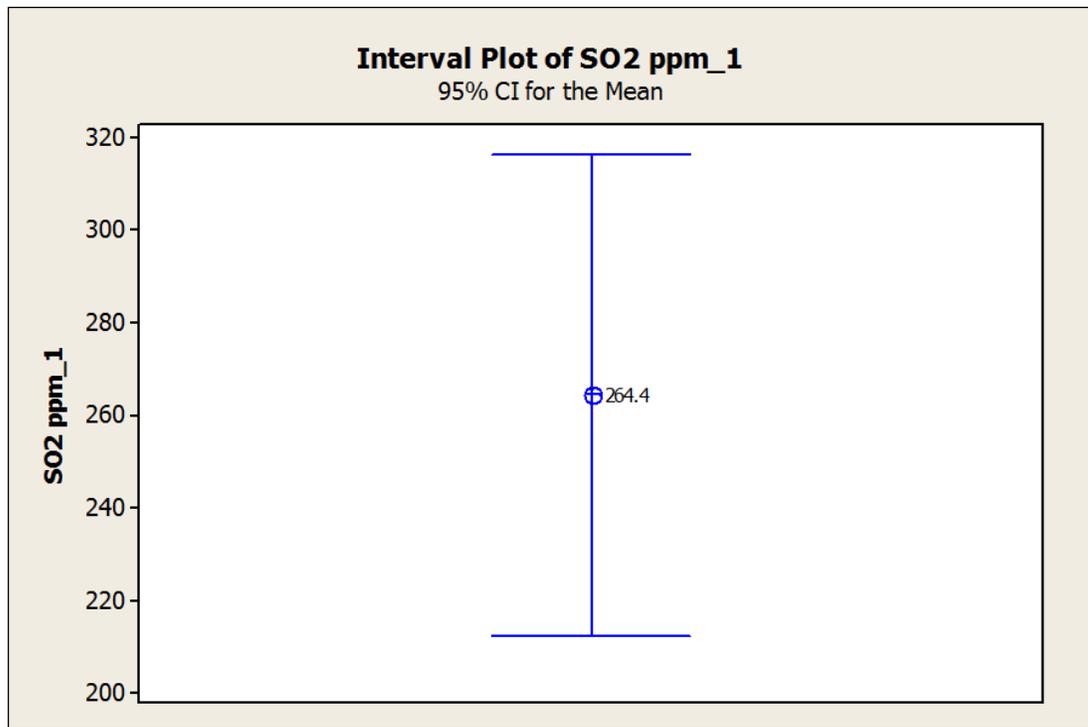
Las emisiones generadas por la combustión de pellets de aserrín en el calentón radiativo propuesto en este estudio presentan 24% menos CO (grafico 10), 22% menos NOx (grafico 11) y no se generan emisiones de SO<sub>2</sub> (grafico 12). Las emisiones de CO<sub>2</sub> son ligeramente mayores (grafico 13), pero se considera que es la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que el árbol capto durante su vida cerrando de esta manera su ciclo.



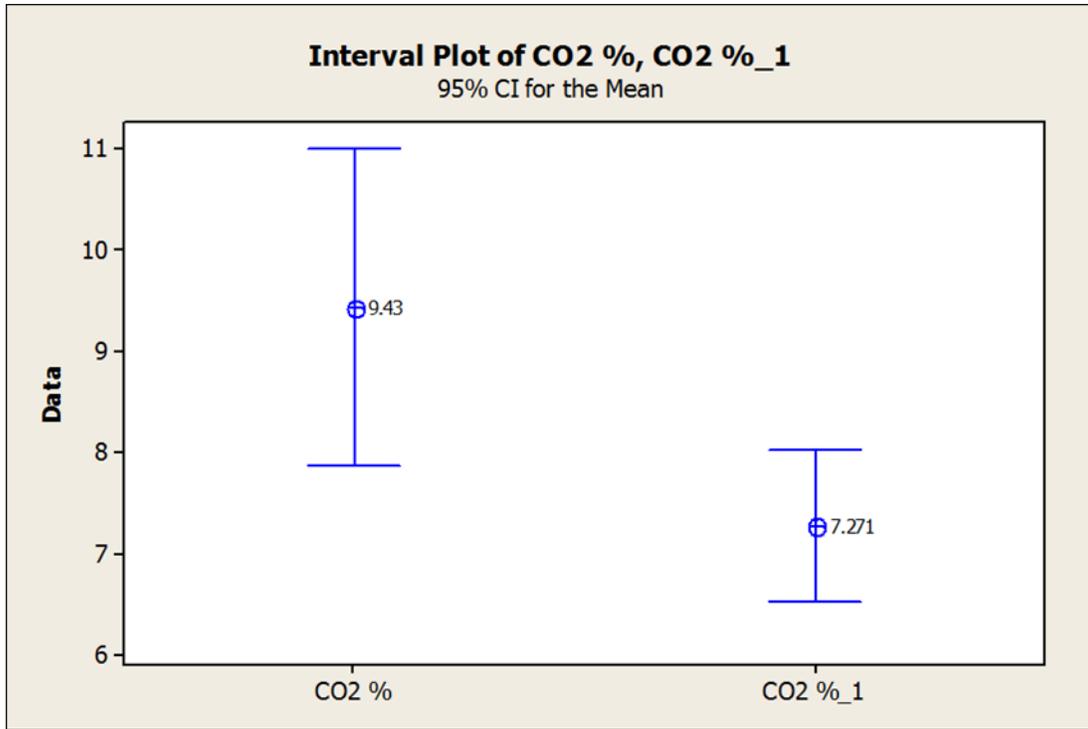
**Grafica 10 Mediciones de CO donde ppm corresponde a las emisiones generadas por la combustión de pellets de aserrín y ppm\_1 a las emisiones por la combustión de aceite residual de motor**



**Grafica 11** Medición de NOx donde ppm\_1 corresponde a la combustión de aceite residual de motor



**Grafica 12** Medición de SO2



**Grafica 13 Medición de CO2 donde %\_1 corresponde a las emisiones generadas por aceite residual de motor**

### 3.4 Análisis Económico

Al presentarse una helada tardía, se instalan de 150 a 250 calentones por hectárea dependiendo del tipo de calentón (fig.8). Asumiendo que se usara diésel como combustible, este tiene un costo de \$13.77/litro y son necesarios aproximadamente 10 litros para llenar el depósito del calentón. El prototipo de calentón radiativo propuesto en este trabajo, necesita 15kg de pellets, y su costo es de \$66.45 la bolsa de 15kg. (Si los pellets de aserrín son comprados a granel su precio disminuye a la mitad) ambas cargas son suficientes para que los calentones permanezcan encendidos de 5 a 6 horas.

La gran diferencia de precio entre el combustible fósil y el biocombustible pellet, provoca un ahorro de aproximadamente el 52% por cada calentón encendido en la huerta.

**Tabla 3 Comparación de costo entre combustibles**

<b>Combustible</b>	<b>Precio unitario \$</b>	<b>Cantidad necesaria</b>	<b>Costo por cada calentón \$</b>
Diesel	13.77 / litro	10 litros	137.7
Pellets	4.43 /kg	15 kg	66.45

La inversión inicial necesaria es de \$450 por cada calentón radiativo usando pellets de aserrín como combustible, dado el ahorro en el costo de operación esta inversión se recuperaría en solo seis veces de uso de los calentones.

## IV CONCLUSIONES

---

Los calentones que se usan actualmente para aclimatar huertas y diferentes tipos de siembras transfieren calor principalmente de forma convectiva, resultando muy poco eficientes ya que el calor generado por este tipo de calentones, forma una pluma que se estanca a un metro de altura sobre el suelo hasta un máximo de 2.4m y una longitud de 2m alrededor del calentón de tal manera que solo se proporciona confort térmico a las plantas que se encuentren localizadas dentro de este volumen de control. Las emisiones generadas por la combustión en este tipo de calentones, forman una capa espesa sobre la siembra, esta capa ayuda a mitigar un poco la pérdida de calor por radiación hacia la atmosfera que está sufriendo la planta y el suelo, pero esta capa provoca contaminación y por lo tanto efectos adversos en la salud de las personas que viven en los alrededores del campo agrícola.

El calentón radiativo usando pellets de aserrín como combustible propuesto como una opción más eficiente, logra proteger de los eventos congelantes huertas de árboles frutales de hasta 3.6m de altura a una longitud de 4.5m alejadas del calentón, además es posible modelar la inclinación de la placa radiante del calentón y de esta manera proteger siembras desde el suelo. Usando biomasa como combustible se logra mitigar la contaminación atmosférica reduciendo la gran cantidad de emisiones que se generan cada año durante la primavera.

El uso de biomasa como combustible reduce el costo de producción en las huertas manzaneras de tal manera que representa un beneficio para los fruticultores.

## V TRABAJOS CITADOS

1. **Blanco, Perez Ana Cristina.** Chihuahua, Primer productor nacional de manzana. [http://w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/PRector/08\\_CHIH/AG\\_Manzana.pdf](http://w4.siap.gob.mx/sispro/IndModelos/PRector/08_CHIH/AG_Manzana.pdf). [En línea] 2008. [Citado el: 20 de Junio de 2011.]
2. *Effect of shelterwood density on nocturnal near-ground temperature, frost injury risk and budburst date of Norway spruce.* **Langvall, O y Löfuenlus, M.O.** 2002, Forest ecology and management, págs. 168: 149-161.
3. *Nocturnal cooling below a forest canopy: Model and evaluation.* **Froelich, N y Grimmond, C.** 2011, Agricultural and forest meteorology, págs. 151: 957-968.
4. *Experimental study of fruit temperature dynamics within apple tree crowns.* **Sandreau, M y A. Marquier, B. Adam, P. Monney, H. Sinoquet.** 2009, Agricultural and Forest Meteorology, págs. 149:362-372.
5. *Meteorological and micrometeorological applications to frost monitoring in northern Italy orchards.* **Rossi, F y O. Facini, S. Loreti, M. Nardino, T. Georgiadis, F. Zinoni.** 2002, Physics and Chemistry of the Earth, págs. 27:1077-1089.
6. *Field evaluation of windbreak protection for orchards.* **W, Dierickx.** 2, s.l. : Biosystems Engineering, 2003, Vol. 84. 169-170.
7. *The effect of a small shade net on the properties of wind and selected boundary layer parameters above and within a citrus orchard.* **J, Tanny y C., Shabtai.** s.l. : Biosystems Engineering, 2003, Vol. 84. 57-67.
8. *Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review.* **J., Tanny.** s.l. : Biosystems Engineering, 2013, Vol. 114. 26-43.
9. *Influence of foliage on radio path losses (PLs) for wireless sensor network (WSN) planning in orchards.* **S, Vougioukas, y otros.** s.l. : Biosystems Engineering, 2013, Vol. 114. 454-465.
10. *Apple orchard frost protection with wind machine operation.* **Ribeiro, A,C y J.P. De Melo-Abreu, R.L. Snyder.** 2006, Agricultural and Forest Meteorology, págs. 141:71-81.
11. *Vineyard frost protection with upward-blowing wind machines.* **M.C., Battany.** 39-48, s.l. : Agricultural and forest meteorology, 2012, Vol. 157.
12. *Micrometeorological test of microsprinklers for frost protection of fruit orchards in Northern Italy.* **Anconelli, S y O. Facini, V. Marletto, A. Pitacco, F. Rossi, F. Zinoni.** 2002, Physics and Chemistry of the Earth, págs. 27:1103-1107.

13. *Tree - Temperature monitoring for frost protection of orchards in semi-arid regions using sprinkler irrigation.* **M.R, Ghaemi A.A, Raffie y A.R, Sepaskhah.** 1, s.l. : Agricultural Science in China, 2009, Vol. 8. 98-107.
14. **Troutman, P.H.** *Orchard Heating Device.* 961662 United States, 14 de June de 1910.
15. **Carder, J.L.** *Device for Preventing Frost in Orchards.* 1111993 Los Angeles California, United States, 29 de September de 1914.
16. **Cobb, E.S.** *Process of Preventing Frost or Heat Injury in Orchards.* 1357314 California, United States, 2 de november de 1920.
17. **Whitlock, L.J.** *Temperature Moderator for Orchards and the Like.* 1398927 United States, 29 de November de 1921.
18. **Christopherson, Ernest W.** *Biomass Pellet-Burning Orchard Heaters.* 5144939 United States, 08 de September de 1992.
19. **Stanislaw Wojcicki, Pullan, Wash.** *Aerosol Generating Rotery Pulse-Jet Orchard Heater.* 5285769 United States, 15 de Feb de 1994.
20. **Nicolas, Callejas Juárez.** *Evaluación de alianza para el campo de los sistemas producto frutícolas en el estado de Chihuahua.* Chihuahua, Chihuahua : Universidad Autonoma de Chihuahua, 2007.
21. **Cengel, Yunus A.** *Transferencia de calor.* s.l. : Mc Graw Hill, 2004.
22. **Gutiérrez, Adriana Mendoza.** *Introducción al uso del Software COMSOL Multiphysics.* Xalapa, Ver. : Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería Mecánica Eléctrica., 2013.
23. *Study of the transfer in solids using infrared photothermal radiometry and simulation by COMSOL Multiphysics.* **Suarez, V, y otros.** México, D.F. : Applied Radiation and Isotopes, 2014, Vol. 86. 260-263.
24. *Investigation of thermal radiation effects on solid oxide fuel cell performance by a comprehensive model.* **Min Zeng, Jinliang Yuan, Jian Zhang, Bengt Sundén, Qiuwang.** 185-196, s.l. : Journal of Power Sources, 2012, Vol. 206.
25. *Understanding forced convective drying of apple tissue: Combining neutron radiography and numerical modelling.* **Wondwosen Aregawi, Thijs Defraeye, Saba Saneinejad, Peter Vantobel, Eberhard Lehmann, Jan Carmeliet, Pieter Verboven, Dominique Derome, Bart Nic.** s.l. : Innovate Food Science and Emerging Technologies, 2013, Vol. Article in Press.

26. *Modeling heat and mass transfer during vacuum freezing of puree droplet.* **C. Cogné, P.U. Nguyen, J.L. Lanoisellé, E. Van Hecke, D.Clausse.** 1319-1326, s.l. : Refrigeration, 2013, Vol. 36.
27. *Design and optimization of lab scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application.* **Prasad, Likhendra y Muthukumar, P.** s.l. : Solar Energy, 2013, Vol. 97. 217-229.
28. *Parametric and transient analysis of non-isothermal, planar solid oxide fuel cells. .* **Tseranis, K, y otros.** s.l. : International Journal of Hydrogen Energy, 2012, Vol. 37. 530-547.
29. *A frost assessment method for mountainous areas.* **L, Lindkvist, T, Gustavsson y J., Bogren.** s.l. : Agricultural and forest meteorology, 2000, Vol. 102. 51-67.
30. *Investigation of crop canopy temperature in apple orchard.* **L, Tökei y Z., Dunkel.** s.l. : Physical and Chemistry of the earth, 2005, Vol. 30. 249-253.
31. *Study of the transfer in solids using infrared photothermal radiometry and simulation by COMSOL Multiphysics.* **V. Suarez, J. Hernández Wong, U. Nogal, A. Calderón, J.B. Rojas-Trigos, A.G. Juárez, E. Marín.** 260-263, México, D.F. : Applied Radiation and Isotopes, 2014, Vol. 83.
32. *Understanding forced convective drying of apple tissue: Combining neutron radiography and numerical modelling.* **Wondwosen Aregawi, Thijs Defraeye, Saba Saneinejad, Peter Vantobel, Eberhard Lehmann, Jan Carmeliet, Pieter Verboven, Dominique Derome, Bart Nicolai.** s.l. : Innovate Food Science and Emerging Technologies., 2013, Vol. Article in Press.
33. *Design and optimization of lab scale sensible heat storage prototype for solar thermal power plant application.* **Likhendra Prasad, P. Muthukumar.** 217-229, s.l. : Solar Energy, 2013, Vol. 97.
34. *Parametric and transient analysis of non-isothermal, planar solid oxide fuel cells.* **K. Tseranis, I. Bonis, I.K. Kookos, C. Theodoropoulos.** 530-547, s.l. : International Journal of Hydrogen Energy, 2012, Vol. 37.
35. **Cengel, Yunus A.** *Transferencia de calor.* México DF : Mc Graw\_Hill, 2004.
36. **Gutiérrez, Adriana Mendoza.** *Introducción al uso del Software COMSOL Multiphysics.* Xalapa Veracruz, México : Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería Mecánica Eléctrica, 2013.

37. *Investigation of thermal radiation effects on solid oxide fuel cell performance by a comprehensive model.* **Min Zeng, Jinliang Yuan, Jian Zhang, Bengt Sundén, Qiuwang.** s.l. : Journal of Power Sources, 2012, Vol. 206. 185-196.

38. *Modeling heat and mass transfer during vacuum freezing of puree droplet.* **Cogné, C, y otros.** s.l. : Refrigeration, 2013, Vol. 36. 1319-1326.

### Anexo 1 Prácticas de Protección contra heladas (fuente: FAO 2005)

Cultivo	País	Método de protección	% Cultivos protegidos
Almendra	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
Cultivos de campo	Jordán	Calentadores	
		Aspersores	
		Túneles de plástico	
		Siembra tardía	
Manzana	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
Árbol de Manzana	México (Chihuahua)	Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	50%
		Máquinas de viento (Ventiladores de soplado horizontal)	25%
		Máquinas de viento con Aspersores	25%
Plátano	Chipre	Aspersores convencionales sobre las plantas	
		Nebulizadores artificiales	
Arándano	Argentina (Buenos Aires)	Aspersores sobre las plantas	100%
Budlings	Zimbabue	Evitar etapas sensibles	
		Producción en ambientes protegidos	
		Barreras físicas, paredes y arbustos	
		Cultivo con cobertura de césped	
		Riego por aspersión	
		Según la dirección del viento se queman neumáticos o estiércol de vaca para generar calor	
		Ventiladores y otras máquinas de viento	

Cereza	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
Cereza	Turquía	Estufas de combustible Sólido	
		Niebla artificial	
Chile (momento de trasplante)	México (Chihuahua)	Aplicación de bacteria denominada NINA	30%
		Plantas en invernaderos	70%
Cítricos	Argentina (Buenos Aires)	Aspersores sobre las plantas	
Cítricos	Grecia	Micro-aspersores bajo las plantas	20%
		Máquinas de viento	10%
		Máquinas de viento (soplado vertical)	2%
		Aspersores convencionales por debajo de la planta	3%
		Aspersores y estufas	1%
		Pulverización con compuestos que contienen cobre	1 - 2%
Café	Zimbabue	Aspersores convencionales sobre las plantas	
		Abono de césped	
		calentadores (madera)	
		Toma de tierra y tallos	
		La hierba cubre el resto de las plantas	
		Apertura de las cuencas de drenaje para fluir el aire	
		Atención ante las advertencias de Heladas	
		Plantaciones en montículos	
		se cubre el cultivo con papel	
		Separar el cultivo del suelo pocas semanas antes de las heladas	

		Seleccionar correctamente el sitio del cultivo	
Sandía	Zimbabue	seleccionar el sitio del cultivo para protegerlo de las heladas	
		Selección de cultivos tolerantes al frío	
		Evitación de etapas sensibles para el cultivo	
		Suelos compatibles con el invierno	
		producción del cultivo en invernaderos	
		aspersores por inundación	
		Riego por inundación	
		Quemado de llantas y estiércol de vaca	
		Ventiladores y otras Máquinas de viento	
		protección de plantas dentro de bolsas de plástico	
		Flores	
Selección de cultivos tolerantes al frío			
Evitar las heladas durante los periodos sensibles del cultivo			
Suelos compatibles con el invierno			
producción de cultivos en invernaderos			
Barreras físicas			
Cubrir los cultivos con césped o con papel en la tarde			
Riego con aspersor			
Riego por inundación			
Quemado de llantas y estiércol de vaca			
Ventiladores y otras			

		Máquinas de viento	
		Dar calor a los yacimientos	
Uvas	Uruguay	Nebulizadores artificiales	
		Estufas de combustible (madera, carbón)	
		Ventiladores que expulsan el aire hacia arriba	
Vegetales y Flores en Invernaderos	Chipre	Expulsión de aire caliente usando estufas de gasolina	
Kiwi	Grecia	Micro-aspersores bajo las plantas	20%
Aceitunas	Turquía	Estufas de combustible solido	
		Niebla artificial	
Duraznos	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Liquido (aceite, petróleo)	
Duraznos	Grecia	Micro-aspersores debajo de las plantas	10%
		Aspersores convencionales debajo de las plantas	25%
		Aspersores y estufas	25%
		Pulverización con compuestos que contienen cobre	10-15 %
Duraznos	México (Chihuahua)	Calentones de combustible Liquido (aceite, petróleo)	100%
Duraznos	Turquía	Calentones de combustible solido	
		Niebla artificial	
Peras	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Calentones de combustible Liquido (aceite, petróleo)	
Papas	Chipre	Aspersores convencionales sobre las plantas	
Papas	Zimbabue	Selección de un buen sitio (sitios libres de heladas)	60%
		Evitar las heladas durante los periodos sensibles del	

		cultivo	
		Suelos compatibles con el invierno	
		Barreras físicas	
		Cubrir los cultivos con césped o con papel en la tarde	
		Riego con aspersor	
		Riego por inundación	
		Quemado de llantas y estiércol de vaca	
		Ventiladores y otras Máquinas de viento	
Ciruela Pasa	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
Frutas con hueso	Argentina (Buenos Aires)	Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
		Calentones de combustible	
		Regado de superficies con Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
		Aspersores convencionales sobre las plantas	
		Helicópteros	
Tomates	Zimbabue	Selección de un buen sitio (sitios libres de heladas)	
		Selección de cultivos tolerantes al frío	
		Evitar las heladas durante los periodos sensibles del cultivo	
		Suelos compatibles con el invierno	
		producción de cultivos en invernaderos	
		Barreras físicas	
		Cubrir los cultivos con césped o con papel en la tarde	
		Riego con aspersor	

		Riego por inundación	
		Quemado de llantas y estiércol de vaca	
		Ventiladores y otras Máquinas de viento	
		Cosecha de cultivos forzados	
		Botellas con agua junto a plantas	
Viñedos	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación	
		Estufas de combustible Líquido (aceite, petróleo)	
Trigo	Zimbabue	Evitar que el cultivo florezca durante periodos de heladas	
		Riego sobre las plantas	