



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA



CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DEL HONGO

SETA (*Pleurotus ostreatus*).

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA:

LUIS GERARDO RUIZ GONZÁLEZ



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

**Febrero 2016
Chapingo, Estado de México**

CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DEL HONGO
SETA (*Pleurotus ostreatus*)

Tesis realizada por **Luis Gerardo Ruiz González** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
Dra. Raquel Salazar Moreno

ASESOR: 
Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

ASESOR: 
Dr. Abraham Rojano Aguilar

DEDICATORIA

A Mary por el amor y apoyo incondicional hacia mi persona, por pasar momentos buenos y malos a mi lado. Por alentarme a continuar juntos en este largo, duro y difícil camino que se llama vida.

A mis padres porque no tengo manera en cómo agradecerles por todo lo que han hecho por mí y mi familia.

A mis sobrinos, para cuando deseen y quieran leer sus nombres aquí: Rodo, Fer, Gogo y Ethan.

A mis hermanos Luz y Alberto.

A mis abuelitos Lucio y Hermelinda, Alfonso y Aurora.

A mi cuñadito Alfonso Castillo.

A Luis Gerardo, por su paciencia y dedicación, porque se puede aprender de todo y de todos.

Cuando más oscuro está es porque ya está amaneciendo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado la oportunidad de concluir este trabajo, porque está conmigo en todo momento y no me ha desamparado. Por la vida y bendiciones que me da y por el segundo chance.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que fue indispensable para llevar a cabo las actividades académicas durante mi estancia en el posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT), por la beca otorgada para la conclusión de esta investigación.

A la Dra. Raquel Salazar Moreno, que con su acertada dirección, sugerencias y motivación que hizo posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, por sus sugerencias, experiencia y el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar, por las sugerencias al escrito final.

Al M.C. Mario Hernández por su enseñanza del cultivo del hongo seta, así como las facilidades que me dio para la siembra de los experimentos.

A mis compañeros de posgrado ya que aprendí mucho de ellos.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS DEL AUTOR

Nació el 7 de julio de 1979 en Tlalnepantla Estado de México. En 1985 se muda a Salitrería Texcoco Estado de México. Realizo sus estudios primarios en la escuela “Ramón P. de Negri”, los estudios secundarios en la escuela “Emiliano Zapata”, el bachillerato lo cursó en la “Escuela Preparatoria Texcoco”.

Ingresa a la Universidad Autónoma Chapingo en el año 2000, donde cursa el propedéutico para después ingresar al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, donde termina sus estudios de licenciatura en el año 2005.

Su experiencia laboral ha sido en maquinaria agrícola y de construcción. En el año 2013 se presenta la oportunidad de entrar al programa de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, cursando de forma satisfactoria estos estudios.

CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DEL HONGO SETA (*Pleurotus ostreatus*)

RELATIVE HUMIDITY CONTROL FOR OYSTER MUSHROOM (*Pleurotus ostreatus*) PRODUCTION

Luis Gerardo Ruiz González ¹

Raquel Salazar Moreno ²

ABSTRACT

RESUMEN

La humedad relativa y temperatura son variables climatológicas importantes en la producción del hongo seta. Mantener el nivel óptimo de estas variables ayuda a tener setas de mejor calidad y obtener mayor rendimiento. Una de las metas de este trabajo es controlar la humedad relativa con un sistema nebulizador automático, usando seis sensores de temperatura y humedad relativa. Esta investigación fue realizada en una nave de producción de 9 m³, ubicada en Texcoco México. Para conocer el efecto de la humedad relativa se realizaron dos experimentos: el primero sin control de humedad relativa, el segundo fijando 65-85 % de humedad relativa. El experimento que tuvo mayor producción fue el experimento dos con 12.89 kg, seguido del experimento uno con 11.33 kg. La entalpia calculada para la zona de confort del hongo seta fue de 37.34 kJ kg⁻¹ para 18 °C y 60 % de humedad relativa y 75.49 kJ kg⁻¹ para 28 °C y 80 % de humedad relativa. La transpiración para la zona de confort del hongo seta fue de 2.87 mg cm⁻² h⁻¹ para 60 % de humedad relativa y 1.10 mg cm⁻² h⁻¹ para 80 % de humedad relativa.

Palabras clave: Hongo seta, humedad relativa, temperatura, control automático, red neuronal.

¹ Tesista

² Director

Relative humidity and temperature are important climatological variables in oyster mushroom production. Maintaining the optimum level of these variables improves the oyster mushrooms quality yield. One of the aims of this work is to control the relative humidity with an automatic nebulizer system using six temperature and relative humidity sensors. This research was conducted in a 9 m³ production facility located in Texcoco, Mexico. In order to know the effect caused by relative humidity two experiments were performed: the first without relative humidity control; the second setting the relative humidity at 65-85 %. The experiment with the highest production was the second one with 12.89 kg, followed by the first with a production of 11.33 kg. The enthalpy calculated for the comfort zone of the oyster mushrooms was 37.34 kJ kg⁻¹ to 18 °C and 60 % relative humidity and 75.49 kJ kg⁻¹ to 28 °C and 80 % relative humidity. The transpiration for the comfort zone of the oyster mushroom was 2.87 mg cm⁻² h⁻¹ to 60 % relative humidity and 1.10 mg cm⁻² h⁻¹ to 80 % relative humidity.

Keywords: Oyster mushroom, relative humidity, temperature, automatic control, neural network.

¹ Thesis author

² Thesis advisor

INDICE.

AGRADECIMIENTOS.....	IV
DATOS BIBLIOGRÁFICOS DEL AUTOR.....	V
2. OBJETIVOS.....	11
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
3.1 Morfología, taxonomía y biología de los hongos.	12
3.2 Cultivo del hongo seta.	15
3.2.1 Siembra y producción de los hongos seta.	17
3.2.2 Instalación de una planta productora para el cultivo de hongo seta.	27
3.2.3 Contaminantes, plagas y enfermedades del hongo seta.	33
3.2.4 Condiciones ambientales para el cultivo del hongo seta.	36
3.3 Psicrometría.	41
3.3.1 Carta psicrométrica.	41
3.4 Automatización del riego.	47
3.5 Redes neuronales.	49
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
4.1 Justificación del problema.	57
4.2. Experimento.	58
4.4 Sembrado del hongo seta en el sustrato.	68
4.5 Diseño experimental.....	73
4.6 Análisis de los datos obtenidos.	73
4.7 Análisis económico.....	76
5. RESULTADOS.....	78

6. CONCLUSIONES	94
7. LITERATURA CITADA.	98
8. ANEXOS.....	103
8.1 Programación de arduino para la recolección de datos y sistema de encendido y apagado del sistema nebulizador.....	103

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Morfología de una seta típica.....	14
Figura 2. Proceso de pasterización del sustrato.	18
Figura 3. Siembra del micelio al boleó.	19
Figura 4. Acomodo de los hongos seta en estantería.....	21
Figura 5. Acomodo de los hongos seta en forma de brocheta.....	22
Figura 6. Acomodo de los hongos seta en forma de salchicha.....	22
Figura 7. Acomodo de los hongos seta en gancho.	23
Figura 8. Producción de hongo seta.	25
Figura 9. Diseño para la construcción de los invernaderos para la incubación y producción del hongo seta.....	32
Figura 10. Hongo de la penicilina atacando al hongo seta.	35
Figura 11. Carta psicométrica, donde se observa la zona de confort del hongo seta.	42
Figura 12. Tipos de bulbos para medir la temperatura.	45
Figura 13. Morfología de una neurona.....	50
Figura 14. Red neuronal artificial perceptrón multicapa con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de escape.....	52

Figura 15. Ubicación de la unidad de producción de hongo seta.	58
Figura 16. Adecuación del inmueble donde se realizaron los experimentos de siembra.	59
Figura 17. Arduino ATMEGA 2560.	60
Figura 18. Sensor DHT 11.	61
Figura 19. Display usado en el sistema de adquisición de datos.	61
Figura 20. Reloj RTC usado en el sistema de adquisición de datos.	62
Figura 21. Tarjeta de memoria SD.	62
Figura 22. Diagrama de instalación del sistema de adquisición de datos, encendido y apagado del sistema nebulizador	63
Figura 23. Sistema integrado para la adquisición de datos de los sensores.. ..	63
Figura 24. Bomba de ½ HP..	64
Figura 25. Filtro en línea del sistema nebulizador.	64
Figura 26. Nebulizadores de 9 lpm.	65
Figura 27. Depósito de agua con capacidad de 400 litros.	65
Figura 28. Arreglo de los sensores dentro del inmueble	66
Figura 29. Sensores DHT11 dentro de la unidad de producción.	67
Figura 30. Sistema de nebulización funcionando en la unidad de producción..	68
Figura 31. Proceso de pasteurización del sustrato	69
Figura 32. Siembra del micelio en el sustrato.	71
Figura 33. Incubación del micelio.	72
Figura 34. Producción del hongo seta.	72
Figura 35. Variables de entrada y salida de la red neuronal artificial.	76
Figura 36. Comportamiento diario de temperatura experimento 1 sensor 3.	79

Figura 37. Comportamiento diario de temperatura experimento 2 sensor 3.	80
Figura 38. Comportamiento diario de humedad relativa experimento 1 sensor 3.	80
Figura 39. Comportamiento diario de humedad relativa experimento 2 sensor 3.	81
Figura 40. Distribución de temperatura y humedad relativa del promedio de los sensores del experimento 1.	82
.....	82
Figura 41. Distribución de temperatura y humedad relativa del promedio de los sensores del experimento 2.	82
Figura 42. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 3.	85
Figura 43. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 3.	85
Figura 44. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 4.	86
Figura 45. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 4.	86
Figura 46. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 5.	87
Figura 47. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 5.	87
Figura 49. Comportamiento de la transpiración durante la cosecha del hongo seta en el experimento 2.	89

Figura 50. Valores reales y predichos de temperatura con el modelo dinámico experimento 2 sensor 3.	92
Figura 51. Valores reales y predichos de humedad relativa con el modelo dinámico experimento 2 sensor 3.	93

INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Áreas consideradas en la construcción de una planta productora de setas..	33
Cuadro 2. Gastos fijos para la siembra del hongo seta.	77
Cuadro 3. Gastos variables para sembrar hongo seta.....	77
Cuadro 4. Producción de hongo seta en experimento 1.	78
Cuadro 5. Producción del hongo seta en el experimento 2.	78
Cuadro 6. Producción total de hongo seta en cada experimento.	78
Cuadro 7. Entalpía calculada para la zona de confort del hongo seta con la ecuación 2.	83
Cuadro 5. Entalpia calculada para los sensores 3, 4 y 5 en cada experimento.	84
Cuadro 9. Transpiración para la zona de confort del hongo seta calculada con la ecuación 1.	88
Cuadro 10. Transpiración del hongo cerca de cada sensor para los dos experimentos.	89
Cuadro 11. Resultados estadísticos en entrenamiento validación y prueba de la red neuronal estática para la variable temperatura.....	90

Cuadro 12. Resultados estadísticos en entrenamiento validación y prueba de la red neuronal estática para la variable humedad relativa.....	91
Cuadro 13. Resultados estadísticos de temperatura de la red neuronal dinámica.	91
Cuadro 14. Resultados estadísticos de humedad relativa de la red neuronal dinámica.	92

INDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Transpiración.....	(41)
Ecuación 2. Entalpia.....	(47)
Ecuación 3. Error cuadrado medio.....	(76)
Ecuación 4. Raíz error cuadrado medio.....	(76)
Ecuación 5. Raíz relativa del error cuadrado medio.....	(76)
Ecuación 6. Error absoluto medio.....	(77)
Ecuación 7. Error absoluto medio relativo.....	(77)

1. INTRODUCCIÓN.

La producción comercial de hongos comestibles es una actividad relevante en México, desde el punto de vista social, económico y ecológico. México genera alrededor del 59 % de la producción total de Latinoamérica, ubicándose en el lugar 18 como productor a nivel mundial (García et al., 2013).

En México se cultivan cinco especies de hongos con fines comerciales: el champiñón (*Agáricus bisporus*), el portobello (*Agáricus brunnesces*), el seta (*Pleurotus ostreatus*), el hongo blanco (*Tricholoma magnivelare*) y el shiitake (*Lentinus edodes*) (Flores et al., 2012).

En el año 2014, la superficie cosechada a nivel nacional fue de 22.15 ha, con un rendimiento de 65,840 kg ha⁻¹ y un precio de \$21,146.49 MXN por 1000 kg (SAGARPA, 2015).

El hongo seta puede cultivarse en cualquier espacio; no importa si es rustico o tecnificado; siempre y cuando se cumplan tres condiciones importantes para su desarrollo: higiene en el inmueble, alta humedad relativa y poca luz (Gaitán et al., 2006).

El cultivo de los hongos comestibles sobre esquilmos y desechos agroindustriales, representa una buena alternativa en la obtención rápida de alimentos ricos en proteínas. *Pleurotus ostreatus* y especies afines, las conocidas orejas blancas o de palo o setas, son de amplia aceptación y fácil cultivo (Guzmán et al., 1993).

El valor nutritivo de los hongos comestibles es alto, contrario a lo que se piensa. Estudios realizados por especialistas en alimentos, indican que los hongos tienen entre 19 a 35 % de proteínas aprovechables en peso seco, en comparación con los vegetales, que solamente tienen 7.3 a 13.2 %; por otra parte la leche, carne y huevos tienen de 25 al 90 % de proteínas. Además, el contenido de ácidos y grasas esenciales como el oleico y linoleico se encuentra en cantidades apreciables, por lo que los hongos comestibles son un alimento adecuado para el ser humano (Chang et al., 1978).

El problema típico de producción de hongos sujeto a un monitoreo frecuente de temperatura y humedad es el reto de la producción intensiva. Aun cuando existen otras variables como la luminosidad y ventilación (Rinker, 1986).

La influencia de la temperatura y la humedad es un caso particular de la psicrometría, la cual es una teoría ampliamente usada en explicar los procesos ambientales, sin embargo poco a poco se han investigado las particularidades que cada situación atmosférica genera. La presencia de vapor de agua en la atmosfera implica desarrollar o adaptar nuevas herramientas para entender, predecir y controlar o adaptarse a las condiciones probables de escenarios futuros de la humedad relativa donde la temperatura puede cambiar en varios grados (Bartzanas et al., 2007).

Es de gran importancia que el cultivo de hongo seta se encuentre en su zona de confort, que implica en contar con las condiciones óptimas de humedad relativa

que son de 60 a 80 % y temperatura de 18 a 28 °C a fin de obtener el mayor rendimiento posible al momento de la cosecha.

La humedad relativa puede aumentarse con ayuda de un sistema de riego adecuado a las condiciones climatológicas que el hongo seta requiere. El riego proporciona a la planta el agua necesaria para su crecimiento y desarrollo. Dada la escasez de agua, es importante que el riego se aplique con la mayor eficiencia. Una de las alternativas para lograr este objetivo es la utilización de sistemas de riego con programación de autocontrol: se trata de sistemas que establecen la ejecución automática de riegos mediante la valoración continua de uno o varios parámetros de control. Los factores de control pueden ser edáficos (como la humedad), indicadores compuestos que relacionan variables meteorológicas y el cultivo (como la demanda evapotranspirativa), y en general, variables que permitan determinar, en forma continua el momento y cantidad de agua necesaria para un cultivo, de tal forma que el sistema tome decisiones con el apoyo en estos indicadores en tiempo real. Es importante resaltar que la aplicación del agua en términos de cantidad y oportunidad, se debe realizar con precisión en tiempo real (Lugo et al., 2011).

Los parámetros ambientales más importantes que deben controlarse con sensores y otros dispositivos electrónicos, para lograr un clima óptimo son la temperatura, humedad relativa y el dióxido de carbono. La temperatura es importante en el control climático, ya que desempeña un papel importante en el crecimiento y el desarrollo de las plantas. La temperatura óptima depende de la especie de planta cultivada y el nivel deseado de actividad de fotosíntesis. El

control de la humedad es de vital importancia ya que el crecimiento óptimo de las plantas solo puede lograrse dentro de un cierto rango de humedad. Los ambientes muy secos disminuyen el ritmo de crecimiento de las plantas. La humedad relativa óptima depende del tipo de planta que se cultive (Vaisala, 2013). Sin embargo, muchas veces la lectura del sensor puede ser errónea. Por esta razón es importante validar su lectura mediante el uso de modelos que tengan una buena predicción porque de este modo cuando la lectura sea errónea se puede utilizar la salida de un modelo de redes neuronales basado en la información existente.

Una red neuronal es un sistema de computación compuesto por un gran número de elementos simples, elementos de procesos muy interconectados, los cuales procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas (Matich, 2001). En muchas investigaciones se han presentado las redes neuronales artificiales para mostrar el poder predictivo superior que tienen en comparación con los métodos tradicionales de modelación estadística. Se conocen como modelos de "caja negra", ya que los parámetros no tienen una interpretación aplicada al modelo bajo estudio (Olden et al., 2002).

2. OBJETIVOS.

Mantener la temperatura y la humedad relativa en la zona de confort para el hongo seta a fin de maximizar los rendimientos, instalando un sistema de nebulización controlado por sensores de temperatura y humedad relativa. La señal de los sensores activará el sistema de nebulización, de acuerdo al porcentaje de humedad relativa alrededor del hongo seta.

Objetivos particulares

- Instalar y controlar un sistema de nebulización automático acorde a las necesidades ambientales óptimas que requiere el cultivo de hongo seta.
- Estudiar la distribución de temperatura y humedad relativa en una instalación de hongo seta, y saber qué tan lejana se encuentra respecto a la zona de confort del hongo (rangos óptimos de humedad y temperatura).
- Construir un modelo de redes neuronales para predecir temperatura y humedad relativa, para encontrar el área de la instalación que se encuentra más afectada por las condiciones externas y así procurar no poner los hongos seta en esos lugares.

3. REVISIÓN DE LITERATURA.

3.1 Morfología, taxonomía y biología de los hongos.

Los hongos setas se desarrollan principalmente sobre troncos en descomposición u otros sustratos vegetales. Cada hongo está formado por una serie de finos filamentos llamados hifas, que en conjunto forman lo que se denomina micelio. En la naturaleza y bajo condiciones favorables de humedad y temperatura, este micelio extendido sobre un sustrato adecuado, se transforma en pequeños grumos que van aumentando de tamaño hasta formar la típica seta. El hongo formado con su sombrero y su pie, tiene la función de producir las estructuras de reproducción llamadas esporas cuya misión es perpetuar la especie. Estas esporas se forman en la cara inferior del sombrero, en unas laminillas verticales que se extienden desde la parte superior del pie hasta el borde del sombrero (Gaitán et al., 2006).

Los hongos como las setas, pertenecen al Reino Fungí que son organismos eucarióticos filamentosos y en raras ocasiones, unicelulares. Los hongos son heterótrofos saprobios o parásitos, su nutrición es por absorción. Se han descrito cerca de 100 000 especies. La clasificación de los hongos es compleja y muy discutida (García et al., 2013).

Existe una clasificación sencilla de los hongos que los agrupa en microscópicos y macroscópicos (micromicetos y macromicetos, respectivamente), la cual se basa en si presentan o no cuerpos fructíferos grandes. Dichas fructificaciones son a las que comúnmente se les llama hongos; por ejemplo, fructificaciones del

champiñón, de las setas o de cualquier hongo que crece en el jardín o en el bosque. Sin embargo, estas estructuras mal llamadas hongos, constituyen el fruto del verdadero hongo, el cual vive y se desarrolla en el suelo o substrato donde crecerá (Guzmán et al., 1993).

Es fundamental que el hongo que se va a cultivar se identifique correctamente desde el punto de vista taxonómico, ya que de ello dependerán las técnicas que se empleen para su cultivo. La identificación de la especie, quiere decir conocer a qué especie de tal género está adscrito el hongo en cuestión (Guzmán et al., 1993).

Las setas pertenecen al grupo de los basidiomicetos, con este nombre se denominan los hongos que conocemos, champiñones y las setas (de sombrerillo). En la mayor parte, bajo el sombrero hay unas laminillas en las que se forman las esporas. Estas esporas reciben el nombre de basidiosporas y se producen en grupos de cuatro a partir de una gran célula llamada basidio (García et al., 2013). La palabra *Pleurotus* proviene del griego “pleura” que significa formado “lateralmente”, lo cual se refiere a la posición lateral del estípite (pie) respecto al píleo (sombrero). Los hongos de este género son comestibles, degradadores de madera, aunque en ocasiones se desarrollan como parásitos; viven en zonas templadas, tropicales; y subtropicales; el píleo tiene forma de abanico y crece a manera de repisas sobre la madera muerta. El estípite es corto o mal definido, generalmente excéntrico o lateral, blanco pálido, cuya base puede ser pubescente (García et al., 2013).

El píleo es una expansión lateral del ápice del estípite, convexo o caso plano, liso y de color blanco a café grisáceo, algunas especies son de color azul, verde, amarillas o lilas. El himenio (parte inferior del píleo) está formado por láminas estrechas, delgadas, blancas o blanquecinas, las esporas son lisas, de forma cilíndrica, su conjunto (esporas) es blanca, crema o color gris amarillento pálido (García et al., 2013). En la Figura 1 se presenta la morfología de una seta típica.

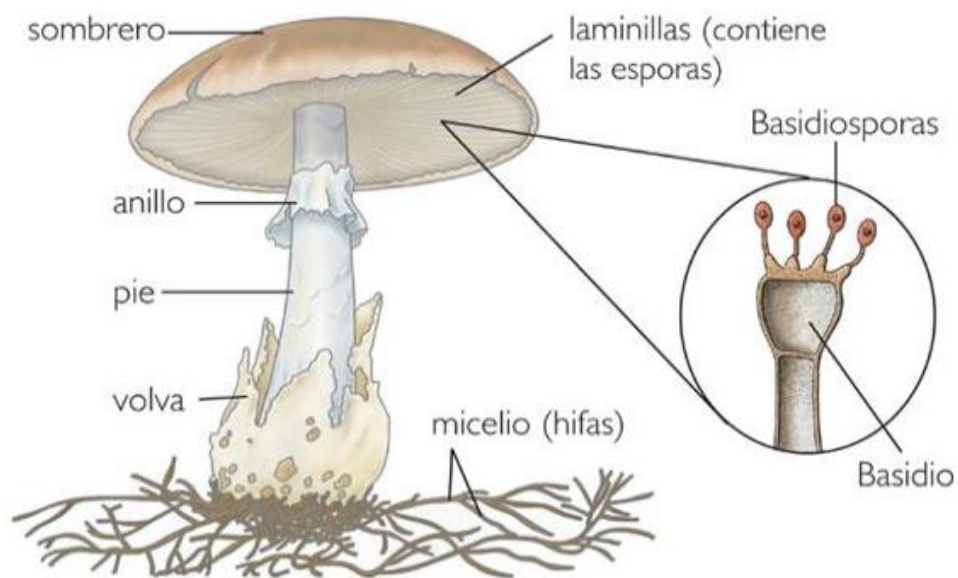


Figura 1. Morfología de una seta típica. Fuente: Castro, 2012.

Además de que los hongos se caracterizan por almacenar glucógeno y tener quitina en la pared celular como sucede con los animales, su nutrición es por absorción y no por ingestión como en los animales o por fotosíntesis y absorción en los vegetales (Guzmán et al., 1993).

Para el buen crecimiento de un hongo, es necesario que en el sustrato en donde se desarrolla se encuentren todas las sustancias que necesita, como son fuentes de carbono y nitrógeno, además de otros elementos como el fósforo,

materiales que absorbe con la degradación del substrato en donde crece. En el caso de los cultivos de hongos, los substratos empleados se hacen más digeribles mediante procesos de fermentación o se mezclan entre sí, para suplementar alguna deficiencia en nutrimentos. Los subproductos agrícolas empleados en el cultivo de los hongos, están constituidos principalmente por celulosa (40-60 %), hemicelulosas (15-50 %) y lignina (10-30 %), de los cuales ésta última es de los compuestos más difíciles de digerir debido a su complejidad (Guzmán et al., 1993).

3.2 Cultivo del hongo seta.

El proceso del cultivo de un hongo se inicia con la obtención de la cepa, la cual es la masa de micelio desarrollada sobre un medio apropiado en una caja de petri, en un tubo de ensaye o en un pequeño frasquito en el laboratorio. Este micelio una vez desarrollado debe estar en refrigeración para evitar su envejecimiento y se resembrará periódicamente en otras cajas de petri con el medio apropiado y en condiciones de asepsia. Se debe incubar en una estufa a una temperatura de 27.5-30 °C (Guzmán et al., 1993).

La cepa se puede obtener de una casa comercial o de algún laboratorio especializado y debe tener la identificación taxonómica exacta del hongo sin discusión. También se puede obtener la cepa directamente de un hongo fresco seleccionado, el cual se debe identificar taxonómicamente y guardarse seco en una colección oficial de hongos (Guzmán et al., 1993).

Todos los pasos a seguir en el cultivo del hongo, deberán ser bajo condiciones de asepsia lo más riguroso posible y el material que se use (vidriería y utensilios, como agujas, pinzas, frascos, etc.) deberá esterilizarse en autoclave, olla de presión y horno. Una vez obtenida la cepa por cualquiera de los métodos anteriores, se procede a desarrollar masivamente el micelio en otra caja de Petri para la preparación del inóculo en frascos o bolsas, que servirá a su vez, para el cultivo del hongo en el substrato seleccionado. El medio de la segunda caja de Petri con el micelio ya desarrollado, se cuadricula con un bisturí, de tal manera que se obtengan bloques de 1 cm², cada uno de éstos, se pondrá dentro de un frasco esterilizado de boca ancha con semilla seleccionada y previamente esterilizada. Para ello, primero se pone a remojar la semilla y una vez hidratada se introduce en los frascos en 2/3 partes de su capacidad y se esterilizan. Enfriados los frascos, se inoculan con el bloque de micelio de la caja de Petri, el cual se coloca sobre la superficie de las semillas. Si los frascos son de un litro de capacidad, contendrán aproximadamente 200 gramos de semilla húmeda. Las semillas generalmente empleadas son de trigo, sorgo, centeno, cebada o mijo, dependiendo de su disponibilidad en el mercado (Guzmán et al., 1993).

Los frascos así preparados, se ponen en la obscuridad a una temperatura variable, alrededor de 27.5 °C. Al cabo de 10 a 20 días, el micelio cubrirá todas las semillas y el inóculo estará listo. Estos primeros frascos obtenidos se les llama primarios y de ellos se pueden obtener otros más, conocidos como secundarios; resembrando el micelio de las semillas del frasco primario en otros frascos con semilla recién preparada. Se obtienen así cinco frascos secundarios por cada

frasco primario. Se pueden usar en la preparación de los frascos secundarios, bolsas de polipapel que los substituyen bien y ahorran espacio y gastos innecesarios (Guzmán et al., 1993).

3.2.1 Siembra y producción de los hongos seta.

Existen diferentes técnicas y utensilios para la siembra del hongo seta en el sustrato. El sustrato para la siembra del hongo seta puede ser paja de cebada o trigo, pulpa de café, rastrojo de maíz, olotes de maíz, o cualquier desecho agroindustrial, etc. Dependiendo de los materiales que haya en la región y según la variedad de hongo que se va a cultivar. Antes que se proceda a la siembra, es necesario limpiar, lavar y desinfectar el área de sembrado con una solución de agua y cloro.

Sea cual sea el sustrato, éste se someterá a un proceso similar al de la de pasteurización, para eliminar todos los microorganismos presentes en el mismo y que pueden competir con el crecimiento del hongo que se va a cultivar. La Figura 2 muestra el procedimiento de pasteurización del sustrato. Este proceso consiste en sumergir el sustrato en agua caliente a unos 80 °C por espacio de 30 a 45 minutos. Para ello, el sustrato se acomoda en canastas de tela de alambre o de plástico, para evitar que se difunda o diluya en el agua y facilitar su manejo. Botes de metal de 200 litros empleados en la industria en general, son recomendables para el calentado del agua. Una vez pasteurizado y escurrido el sustrato, se deposita sobre una mesa, en un lugar aseado y ajeno a corrientes

de aire, en donde se dejará enfriar por unos minutos, hasta alcanzar menos de 30 °C (Guzmán et al., 1993).

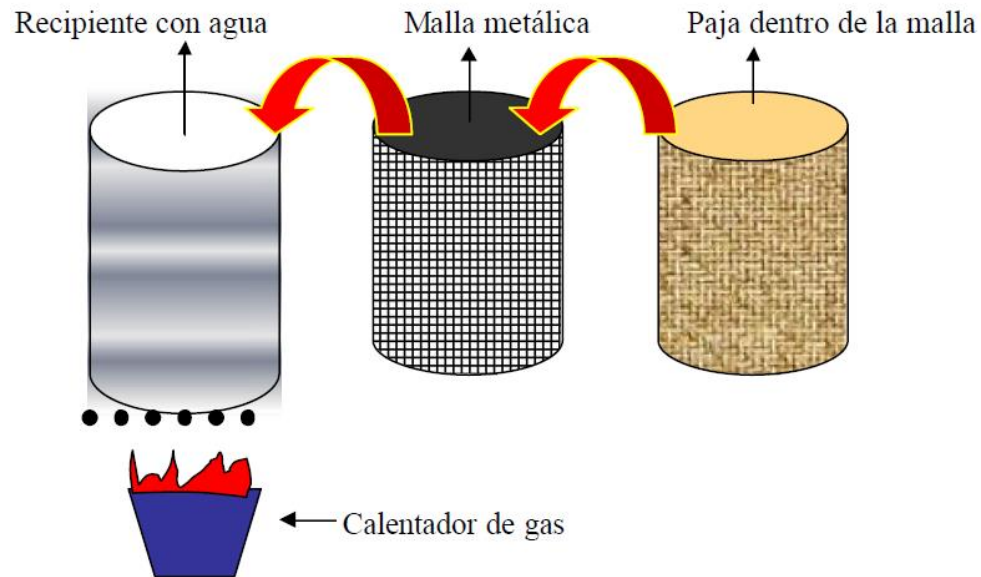


Figura 2. Proceso de pasterización del sustrato. Fernández, 2004.

Enfriado el sustrato se procede a la inoculación con el hongo que previamente se preparó en el laboratorio, ya sea de los frascos o de las bolsas de polipapel. Para ello, se mezcla uniformemente el micelio del hongo creciendo en las semillas con el sustrato pasteurizado, todo dentro de bolsas de plástico de 50 x 70 cm a las cuales se les pone aproximadamente 7 kilogramos de sustrato por un frasco de inóculo de 1 litro o su equivalente en bolsa. A continuación se cierra bien la bolsa, se etiqueta con el número de la cepa empleada, la fecha de siembra y se acomoda en un estante en condiciones de obscuridad y a una temperatura de alrededor de 28°C (Guzmán et al., 1993). La Figura 3 muestra la inoculación del micelio en el sustrato.

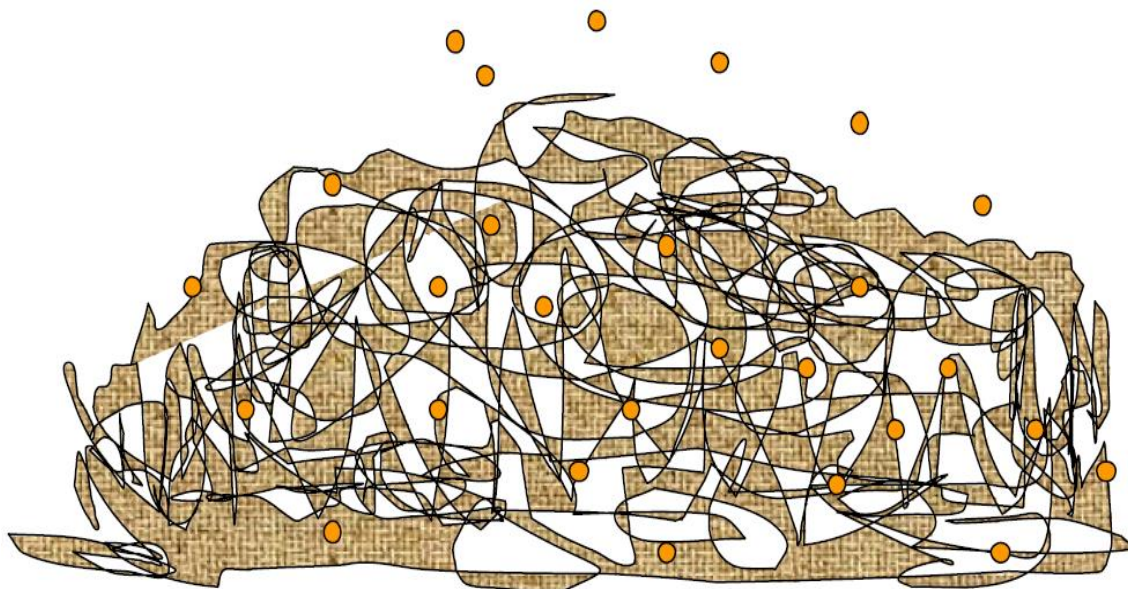


Figura 3. Siembra del micelio al boleto. Fuente: Fernández, 2004.

La siembra y traslado de bolsas sembradas a las naves se realizan en un mismo día, se recomienda que la siembra sea a temperaturas menores de 24 °C si no fuera así, se corre el riesgo que la semilla sufra algún efecto de estrés y tarde más tiempo para iniciar su invasión al sustrato o la semilla que debe permanecer en refrigeración a 4 °C para su óptimo mantenimiento y que será usada en la siembra, deberá de sacarse un día antes de sembrar, para evitar un termoshock “sustrato-semilla” de (4- 26 °C) a (14-22 °C) (Fernández, 2004).

Al tercer día de tener las bolsas inoculadas en la obscuridad, se perforan para facilitar la aireación y el desarrollo del micelio. A partir de la tercera semana, se ponen dichas bolsas bajo la luz indirecta de la planta en donde se cultivarán los hongos, la cual debe estar con una humedad relativa del 80 %, temperatura de 28 °C y con buena ventilación. Inmediatamente que se empiezan a formar los primordios, se remueve totalmente la bolsa de plástico para facilitar el desarrollo de las fructificaciones, mismas que alcanzarán su estado adulto en 5 días,

quedando listos para la cosecha. Cada bolsa soporta entre 2 y 3 cosechas, en intervalos de 10 días y en forma decreciente de rendimiento, hasta que se desechan por ser poco productivas. Una vez cosechados los hongos, están listos para el consumo (Guzmán et al., 1993).

Se le llama incubación al periodo de tiempo en que el sustrato es colonizado por el micelio, el cual tarda de 22 a 30 días en estar totalmente invadido si las temperaturas dentro de las naves de producción se mantienen en una temperatura promedio de 24-26 °C (Fernández, 2004). A partir de la tercera semana, se ponen dichas bolsas bajo la luz indirecta de la planta en donde se cultivarán los hongos, la cual debe estar con una humedad ambiental del 80 %, temperatura de 28 °C y con buena ventilación. Inmediatamente que se empiezan a formar los primordios, se remueve totalmente la bolsa de plástico para facilitar el desarrollo de las fructificaciones; mismos que alcanzarán su estado adulto en cinco días quedando listos para la cosecha (Guzmán et al., 1993).

Existen varias formas de colocar las bolsas dentro del cuarto de producción e inclusive otros tamaños de bolsas. Entre las más comunes están del tipo (Fernández, 2004):

Estantería: esta forma de mantener las bolsas es el más ordenado y con menos riesgos de todo tipo tal como contaminación, accidentes, logística. La Figura 4 muestra el acomodo en estantería.

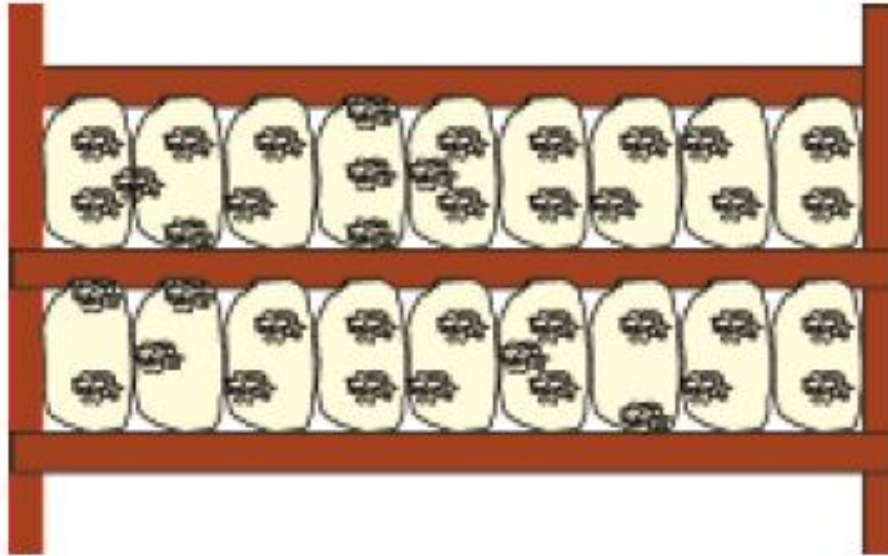


Figura 4. Acomodo de los hongos seta en estantería. Fuente: Fernández, 2004.

Brocheta: tiene el inconveniente de que todas las bolsas son atravesadas por la lanza y si la primera bolsa tiene problemas de infecciones desde la pasteurización, transmite las enfermedades de una bolsa a otra y no pueden verse las zonas infectadas. Es necesario que las brochetas queden ancladas al piso, antes de vaciar el concreto en el piso. La Figura 5 muestra el acomodo en forma de brocheta.

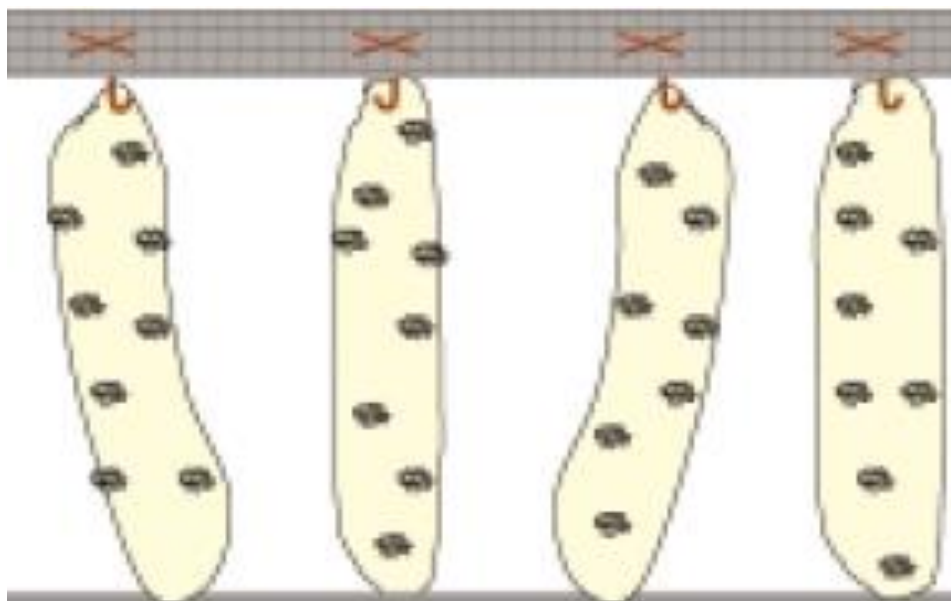


Figura 5. Acomodo de los hongos seta en forma de brocheta. Fuente: Fernández, 2004.

Salchichón: el peso de cada salchichón oscila entre los 50 y 70 kg, la Figura 6 muestra el acomodo de este tipo.

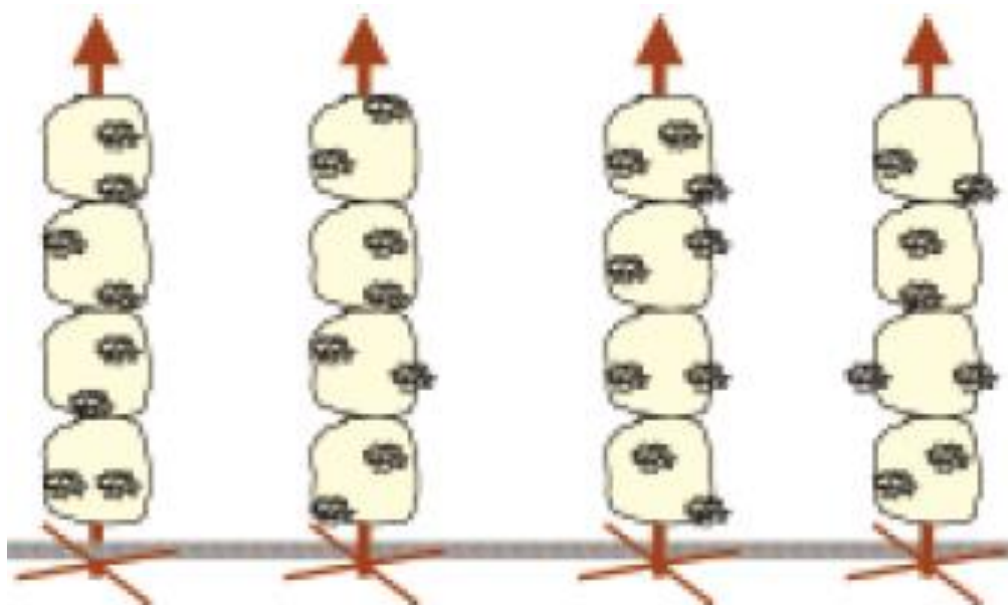


Figura 6. Acomodo de los hongos seta en forma de salchicha. Fuente: Fernández 2004.

Carrusel: primero se ancla al piso un pivote, en la que posteriormente se le ensambla el armazón, la cual gira como carrusel. El problema mayor aparte de los golpes que se da el personal con las puntas metálicas, es al momento de la cosecha, pues al girar las setas se golpean una con otra y se maltratan. No hay suficiente espacio para que las setas crezcan sanas y los riegos no penetran en todas las bolsas.

Enganchadas: es importante que la primera bolsa quede a una altura para que puedan ser alcanzadas y cosecharlas sin mayor problema. Colgando las bolsas una de otra con un gancho en forma de “S” y para evitar que las bolsas giren, colocar unos alambres en ambos lados para que las sujeten. Si el techo resiste se le pueden colgar cuatro bolsas por columna, de lo contrario con tres bolsas con un peso entre 10 y 12 kg no se tendrá problemas. La Figura 7 muestra este tipo de acomodo.

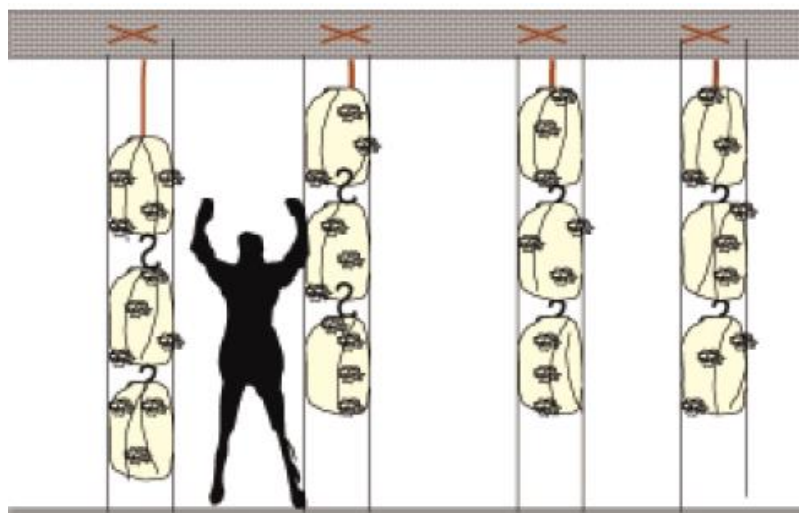


Figura 7. Acomodo de los hongos seta en gancho. Fuente: Fernández, 2004.

La producción es el resultado de la realización de una cadena de procesos de cultivo ordenados, controlados, sistematizados y supervisados de tal forma que la cantidad y la calidad del producto sean satisfactorias. Técnicamente se refiere al cambio de la fase vegetativa del micelio a la fase reproductiva. Los cambios que se dan en los primordios a partir de que aparecen, son muy rápidos de tal forma que se tiene que actuar de la misma manera. En pocos días de (3 a 6) los primordios pasan a tener figura de setas y es en esta fase en la que la temperatura, la humedad y la ventilación afectan significativamente la cantidad y la calidad del producto. La Figura 8 muestra la producción del hongo seta. En el caso de la humedad, si no es suficiente, esto es mantenerse en 80 % de humedad relativa y no menos de 60 % dentro de los cuartos, las setas se secarán y serán abortadas. Respecto a la ventilación, se requieren de 12 cambios por hora para poder tener un crecimiento adecuado de las setas y que las esporas no sean un problema para la cosecha, además si no se tiene esta ventilación, se obtendrá más tallo que cabezas por lo tanto pérdidas en el peso total del producto y por último, la temperatura será un factor determinante de la velocidad del crecimiento. A mayor temperatura de (16-18 °C) se tendrá un crecimiento acelerado y a menor temperatura (4-8 °C) se tendrá pérdida de tiempo por el lento crecimiento (Fernández, 2004).



Figura 8. Producción de hongo seta. Fuente. Autor, 2015.

La producción de los hongos se valora en kilogramo por sustrato, mediante la fórmula de dividir el peso fresco de los hongos cosechados entre el peso seco del sustrato empleado, lo que se le llama eficiencia biológica y se expresa en porcentaje. Una eficiencia biológica adecuada debe ser de alrededor o más del 100 por ciento (Guzmán et al., 1993).

Las bolsas que se contaminen durante el proceso, debido a malos manejos en la pasteurización, enfriamiento e inoculación, se deben eliminar inmediatamente. Cabe señalar que el sustrato de las bolsas ya desechadas después de las cosechas, puede emplearse como abono en la agricultura o jardinería o como ayuda para el alimento del ganado vacuno, caballar o bovino, por lo que es importante resaltar, que la industria del cultivo de los hongos comestibles no produce basura ni contamina (Guzmán et al., 1993).

El área de producción será de fácil limpieza, y con paredes de preferencia lavables, de igual manera la estantería que se emplee. Se pueden utilizar varios sistemas para colocar las muestras en producción, como bolsas en estantes, bolsas colgantes o el uso de estacas, entre otros (Gaitán et al., 2006).

Los primordios requieren en promedio una semana para llegar a ser hongos adultos, que estarán listos para cosecharse cuando el sombrero se observe compacto, turgente, no flácido y antes de que sus orillas se enrollen hacia arriba. La cosecha no necesariamente se concluye en un día, por lo que deberá hacerse una selección de hongos y cortar sólo los de máximo desarrollo. Para la cosecha se recomienda usar una navaja limpia y cortar el pie del hongo lo más cerca posible de la superficie del substrato y evitar dañar tanto al substrato como al hongo. La primera cosecha puede durar entre 1 a 3 días, posteriormente habrá un tiempo de receso de una a dos semanas para que se produzca el siguiente corte, durante el cual es importante mantener las condiciones ambientales adecuadas de temperatura, iluminación y humedad, para evitar daños o contaminación de las muestras. En promedio y dependiendo de la variedad de hongo y substrato, las bolsas de setas producen entre 2 a 4 cosechas, pero las más importantes son las dos primeras, ya que es donde se producen la mayor cantidad de fructificaciones (alrededor del 90 %) (Gaitán et al., 2006).

Aunque las condiciones de humedad ambiental sean controladas, no todas las muestras se humedecen adecuadamente, por lo que será necesario hacer riegos adicionales utilizando manguera con sifón y de preferencia la salida del agua deberá ser muy fina (tipo bruma o vapor), con la finalidad de no dañar las

muestras. Pero si se cuenta con los recursos necesarios, se puede implementar un sistema de riego por medio de tubería de cobre en el techo con pequeñas boquillas atomizadoras que provoquen un riego en forma de niebla y un ducto de plástico para favorecer la circulación de aire (Gaitán et al., 2006).

3.2.2 Instalación de una planta productora para el cultivo de hongo seta.

El diseño y construcción de una planta productora de hongos dependerá del volumen de hongos que el productor pretenda lograr. Se debe considerar que durante el cultivo del hongo seta se requieren controlar varios factores, temperatura, humedad relativa, humedad del substrato, ventilación y luz, entre otros (Gaitán et al., 2006).

Cualquier instalación, pueden ser salas de incubación o producción de setas. La rusticidad no dependerá de la apariencia solamente, sino básicamente de los equipos que puedan adaptárseles a estas instalaciones, esto quiere decir que bien se pueden tener instalaciones rústicas muy bien equipadas y adaptadas para la producción de hongos o instalaciones modernas rústicamente equipadas, que para cuestión de las necesidades de los hongos, lo importante es mantener las condiciones ambientales y biológicas más que estructurales. Sin embargo, el poder mantener en buenas condiciones las instalaciones, por muy rústicas que sean, nos darán mayor probabilidad de producir setas con mayor calidad. Se puede iniciar la producción de Setas *Pleurotus Spp*, con sistemas muy rústicos en un principio, para después darle paso a mayor tecnología y poder considerar la producción rústica hasta este proceso para dar lugar a la producción semi-

industrial, que visto de otro modo podría también considerarse ser semirústico (Fernández, 2004).

Haciendo un análisis prudente de éste sistema se puede decir que el sistema de producción rústico y tradicional es el más conocido y que comúnmente se lleva a cabo en la mayoría de las comunidades tanto urbanas como rurales y son en parte el resultado de la difusión que inicia principalmente por parte de las universidades. Este sistema de producción ha sido el más prolífero por tener como mayor atracción y ventaja la baja inversión que requiere para la producción, sin embargo han sido varios factores los que han hecho que los productores cesen de continuar con la producción de setas aún con los bajos costos que se tienen, de tal forma que se puede mencionar los siguientes factores adversos:

- Falta de formación de unidades integrales de producción: quiere decir que quien se dedique a este cultivo tiene que aprenderse y supervisar todos los procesos al estilo más costoso (prueba y error).
- La falta de asesoría adecuada y profesional.
- Dificultad para conseguir semilla de calidad.
- Baja cantidad y calidad de producto.
- Competencia desleal en la comercialización.
- Falta de organización en la distribución y venta del producto.
- Lento o casi nulo crecimiento de la producción.

Estos factores han provocado que la producción de setas no llegue a considerarse como una empresa seria, aun existiendo apoyos por parte de

instituciones gubernamentales o privadas y también la demanda del mercado nacional como internacional (Fernández, 2004).

Ciertos factores deben tomarse en cuenta cuando se selecciona un sitio para construir un inmueble para el cultivo de los setas tales como: distancia al mercado, disponibilidad de material para el sustrato y agua limpia para regar. Si el nivel de inversión es bajo, los pisos pueden ser de tierra; si la inversión es mayor, éstos deberán ser de cemento con superficie lisa y con una ligera pendiente para poder drenar el exceso de agua (Oei, 2005).

Las puertas y las paredes deben cerrar correctamente para evitar que los insectos entren en los cuartos de cultivo. Una doble puerta, con una malla de alambre de la segunda entrada, puede ayudar a mantener los insectos fuera. Las mismas reglas se aplican para las ventanas. Las aberturas por las que se sopla aire dentro o fuera de las habitaciones deben tener al menos un filtro simple o un paño como barrera (Oei, 2005).

Fernández (2004) da algunas recomendaciones para la construcción del lugar en el que se llevara a cabo la producción de setas:

- En el techo habrá una abertura de 50 cm x 50 cm o una franja de 30 cm al centro por lo ancho del cuarto para permitir entrada de luz, procurando láminas de color oscuro que no permitan la luz directa dentro del cuarto.

- La altura del techo es preferible que sea de 3 m de alto para colocar cuatro niveles de producción y que el tubo de la ventilación no choque con el último nivel.
- Hacer un orificio en la parte central superior del frente del cuarto, para colocar el ventilador.
- Dos orificios de 50 cm x 50 cm en la parte inferior en ambos lados del fondo del cuarto, para expulsar el aire inyectado. En caso de no poder ser así se podrán al frente.
- La estantería tendrá 25 cm de ancho por los metros de largo que permita el cuarto y con cuatro niveles.
- Entre stand y stand un espacio de 90 cm para pasillo de cosecha.

La Figura 9 muestra la propuesta de infraestructura que tiene Gaitán et al, 2006; para obtener una producción de 50 kg día⁻¹ de setas frescas.

1. Laboratorio. Esta área es fundamental en el proceso de producción de la semilla y en el mantenimiento de las cepas. La zona deberá de contar con lo necesario para que la semilla pueda ser lavada, hidratada, escurrida y embolsada. En esta área se debe contar con equipo de esterilización, ollas de presión o autoclaves, así como refrigerador. El piso debe de ser de un material fácilmente lavable, al igual que las paredes. Si el productor prefiere adquirir su inóculo con un proveedor, el laboratorio, la zona estéril de siembra del inóculo y el cuarto de incubación del mismo, se pueden omitir.

2. Cuarto de siembra del inóculo. Esta zona también debe mantenerse en condiciones de asepsia y libre de corrientes de aire. En el interior estará una mesa de trabajo y una cámara de flujo laminar. El piso y paredes deberán ser fácil de lavar y de preferencia de color blanco.

3. Cuarto de incubación del inóculo. Este cuarto tendrá la característica de mantener una temperatura constante, por lo que se recomienda colocar un sistema de aire acondicionado. También es importante que se mantenga oscuro, para favorecer el desarrollo del hongo. Las paredes deberán ser aislantes para evitar cambios bruscos de temperatura, así como la entrada de plagas. El cuarto debe de contar con estantes metálicos (para acomodar las bolsas de inóculo) y con un termómetro para llevar un registro diario de la temperatura.

4. Bodega para almacenar materia prima.

5. Zona para el tratamiento del sustrato. En esta zona no es necesario que haya paredes, pero es recomendable que esté techada y con piso de cemento. Debe de tener un tanque de concreto para el lavado e hidratación de la paja, de 1.5 m de ancho por 1 m de largo y 1 m de alto. También tendrá un sistema de rieles y una polea que permita manipular el contenedor con el sustrato hidratado.

6. Túnel de pasteurización. El túnel debe ser de concreto con paredes aislantes que permitan mantener el calor y puertas herméticas para evitar la fuga de vapor.

7. Cuarto de siembra del substrato. En esta área la higiene es fundamental, por lo que se debe evitar corrientes de aire. Habrá mesas de fácil limpieza para colocar el substrato y repisas para poner los implementos necesarios para la siembra. El piso puede ser de cemento y con plantilla vinílica y paredes lavables.

8. Sanitarios.

9. Oficinas.

10. Cuarto de almacén y empaque del producto cosechado. Este cuarto es para llevar a cabo el control de calidad de los hongos cosechados, así como para pesar y almacenar en refrigeración el producto.

11. Invernaderos.

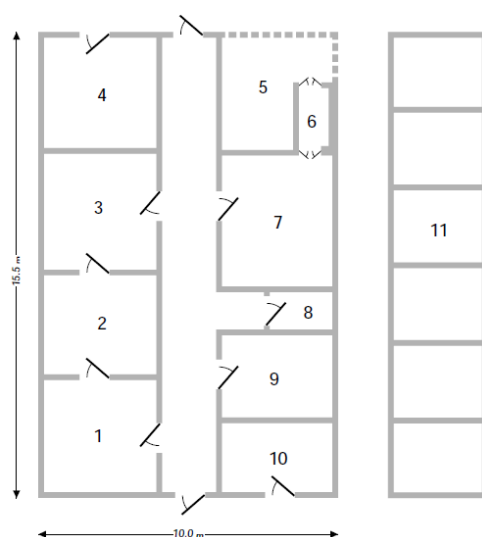


Figura 9. Diseño para la construcción de los invernaderos para la incubación y producción del hongo seta. Fuente: Gaitán, 2006.

El Cuadro 1 muestra la cantidad de espacio requerido por cada área de la nave productora de hongo seta.

Cuadro 1. Áreas consideradas en la construcción de una planta productora de setas. Fuente: Gaitán, 2006.

Área.	Construcción. m ³	Requerimientos.		
		Electricidad.	Agua.	Gas.
Laboratorio.	20	+	+	+
Siembra del inóculo.	10	+		+
Incubación del inóculo.	16	+		
Almacén de materia prima.	16	+		
Zona de tratamiento del sustrato.	16	+	+	
Túnel de pasteurización.	4	+	+	
Área de siembra.	20	+	+	
Sanitarios.	3.8	+	+	
Oficinas.	12	+		
Almacén y empaque del producto cosechado.	12	+	+	
Invernaderos.	74.4	+	+	

3.2.3 Contaminantes, plagas y enfermedades del hongo seta.

Este es uno de los principales problemas a los que se enfrentan los productores de setas. Los contaminantes aparecen por lo general en la fase de incubación, esto debido principalmente a la mala pasteurización del sustrato, al mal manejo del mismo o a la falta de higiene en el momento de la siembra.

Los contaminantes son hongos (mohos), bacterias y levaduras siendo los de mayor importancia los hongos como *Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Neurospora*, *Mycogone* y *Coprinus*, entre otros. Estos hongos aparecen en forma de manchas verdes, amarillentas, negras y/o anaranjadas sobre el sustrato, invadiéndolo de forma rápida y evitando el crecimiento micelial de las setas. Su presencia se ve favorecida por la alta humedad en el ambiente y en el sustrato,

así como por alta temperatura, luz directa y substrato mal pasteurizado, entre otros (Gaitán et al., 2006). En todo ambiente donde interactúan la humedad y la temperatura, generalmente van a aparecer bacterias, hongos, insectos, etc. Por lo tanto, en un cultivo de hongos donde forzosamente se dan estas condiciones, van a aparecer estos organismos. Si no fue bien pasteurizada la paja, se genera el hongo de la penicilina (*Penicillium notatum*) entre los 15 y 20 días de iniciado el cultivo (Flores et al., 2012).

Durante estos días se tiene que llevar a cabo una vigilancia muy estrecha y en cuanto aparezca una pequeña mancha verde dentro de los paquetes cultivados, inmediatamente se debe de sanear. La Figura 10 muestra el hongo de la penicilina. Para hacer la saneación debe abrirse los paquetes mediante una incisión en la bolsa con una navaja limpia y sacar la paja contaminada, se aplica un poco de cloro, alcohol o cal en el sitio en donde se encontraba la penicilina y posteriormente se cierra la bolsa con cinta canela y así, queda saneado el cultivo (Flores et al., 2012).



Figura 10. Hongo de la penicilina atacando al hongo seta. Fuente: Flores, 2012.

Las plagas las constituyen insectos que atacan a los cultivos tanto en incubación como en el área de producción, atraídos por el olor del substrato, estos insectos son las llamadas “moscas de los hongos”, como los Dípteros del género *Lycoriella* que ponen sus huevecillos en el substrato donde en un principio se alimentan del micelio del hongo y después de las fructificaciones adultas. Otros insectos comunes en los cultivos de setas son las llamadas “catarinas”: pequeños escarabajos de los géneros *Mycotretus* y *Pseudyschirus* que se comen los hongos en desarrollo (Gaitán et al., 2006).

Con el brote de los primordios (hongos tiernos) aparecen mosquitos, cochinillas, babosas, etc. Esto ocurre por el intenso olor parecido al del anís dulce que desprende el hongo y que resulta irresistible para dichos insectos, todo esto se puede evitar si se mantiene bien sellado el espacio de cultivo (Flores et al., 2012).

Los perjuicios causados por las cochinillas *Armadiididium vulgare* y babosas *Deroceras reticulatum* son devastadores, ya que los hongos son roídos, por estos insectos y el comprador no acepta bien el producto. Estas plagas pueden combatirse esparciendo cal en pequeñas cantidades sobre el piso, paredes, rincones y recovecos. También pueden eliminarse de forma manual, lo importante es no esparcir insecticidas dentro del cultivo, para no contaminar los hongos (Flores et al., 2012).

Tratándose de plagas de mosquitos *Drosophila melanogster*, se pueden eliminar colocando mosquiteros eléctricos, tiras “pegamoscas” y bolsas con cáscaras de fruta, cortinas de polietileno con aceite de guisar, etc. De estas tres opciones, la forma más ecológica de eliminar estos mosquitos es con las bolsas de fruta, las cuales deben de introducirse al interior del cultivo y se dejan abiertas, cuando los mosquitos se metan se cierran y se sacan las bolsas. En cuanto se detecten los primeros mosquitos, inmediatamente se deben de eliminar, de lo contrario, los mosquitos incubarían sus huevecillos, en el interior de los pasteles, después las larvas se alimentarían de los mismos hongos y además contaminaría los cultivos con el hongo de la penicilina (Flores et al., 2012).

3.2.4 Condiciones ambientales para el cultivo del hongo seta.

Cuando se cultiva hongo seta, el control de los parámetros climáticos es fundamental. El rango de temperatura óptimo es de 18 a 28 °C, para verificar este rango de temperatura es necesario un termómetro en el interior del espacio en el cual reposa el cultivo. La temperatura de fructificación varía con las especies y

aún entre cepas. Generalmente se observa que la temperatura óptima de fructificación es ligeramente más baja que la óptima de crecimiento micelial. Es de hacer notar que la observancia de una temperatura adecuada para el desarrollo del hongo incide directamente en el rendimiento obtenido (Sánchez et al., 2001).

Si la lectura de los sensores es arriba de 28 °C hay que disminuirla, para lo cual, se riega agua en el piso y se abren las ventilas y la puerta hasta regular la temperatura. Si la temperatura está por debajo de 18 °C se cierran las ventilas para que no escape el calor y se mantiene así durante el tiempo que sea necesario para tratar de regular la temperatura y favorecer el buen desarrollo y crecimiento de los hongos (Flores et al., 2012).

La humedad relativa es la relación, expresada en porcentaje, entre la cantidad de vapor de agua realmente existente en la atmósfera y la que existiría si el aire estuviera saturado a la misma temperatura y se mide con un higrómetro. El rango de humedad relativa óptima para el desarrollo de las setas es de 60 a 80 %. Si la lectura ésta arriba de 80 % en el interior del espacio de cultivo, se debe ventilar para que se mezclen el aire del interior y exterior y así se regule la humedad relativa por debajo de 80 %, de lo contrario, el cultivo se estropea por exceso de agua y morirán los primordios. Si ya hay hongos, estos deberán regarse manualmente con atomizador, de lo contrario se podrían estriar o cuartear, estos dejaran de crecer irremediablemente (Flores et al., 2012).

Según Wuest (1982), el riego es un arte en el cual el cultivador debe saber cuándo, cuánto y de qué manera aplicarlo. Esta actividad es dirigida en cierta forma por el conocimiento, la experiencia y la sensibilidad del operario

Generalmente es necesario aplicar riegos en el cuarto de fructificación en algunas horas del día para aumentar la humedad y evitar que el substrato se reseque. Los riegos pueden hacerse, según la necesidad, como pulverizaciones hacia el ambiente o directamente hacia el substrato. En este último caso el flujo del agua debe ser suave, sin mucha presión y en forma de gotas muy pequeñas para no dañar los primordios o la superficie del substrato. Se recomienda que el chorro de agua se aplique hacia arriba en forma de arco, para que las gotas se depositen sobre la superficie de manera suave justo en el momento de iniciar el descenso de dicho arco. La habilidad para tomar la decisión de cuando regar se adquiere con experiencia, ya que no hay manera de hacer una recomendación general. Se sugiere observar el aspecto de los hongos y del substrato, tocarlos y sentir qué tan húmedos están. Los hongos no deben estar resacos o amarillentos; tampoco excesivamente húmedos. Cuando las condiciones de humedad son satisfactorias, el incipiente píleo de los primordios o botones deberá presentar un aspecto suave, terso, carnosos, limpio y brillante, de lo contrario probablemente se requiera un riego. No se recomienda regar cuando los cuerpos fructíferos están ya formados porque se disminuye la calidad (Sánchez et al., 2001).

La renovación de aire en la sala de fructificación debe ser constante porque el incremento en la concentración de CO₂ afecta sensiblemente el desarrollo de las especies de *Pleurotus*. Dependiendo de la cepa, las concentraciones superiores

a 700 ppm, pueden producir desde un ligero alargamiento del estípite, hasta la no formación del píleo y niveles superiores a 1000 ppm pueden inhibir la fructificación. Una ventilación insuficiente propicia la acumulación de CO₂ y el exceso de ventilación puede producir resequedad del sustrato. Por lo mismo, es necesario encontrar un equilibrio que permita un desarrollo adecuado de los cuerpos fructíferos. Para ello se recomienda establecer un sistema de renovación de aire que sea barato y económico. Se puede disponer de ventiladores, extractores, ductos, una chimenea o combinaciones de éstos (Sánchez et al., 2001).

Los hongos requieren de un ambiente en penumbra, es decir a 100 luxes para que el hongo sea de primera calidad, a esta cantidad de luxes el hongo crece bastante tierno y con una coloración muy delicada, hasta una talla de 12 a 15 cm. A plena luz del día se tienen 2000 luxes. Los luxes se miden con un luxómetro. Se puede lograr un estado de penumbra colocando cortinas oscuras o pegando cartón negro en puertas y ventilas. De no tomar en cuenta este parámetro, las fructificaciones van a crecer correosas y descoloridas cuando los hongos alcancen su máxima talla 12 a 15 cm, depreciándose su valor comercial en perjuicio del productor. El acondicionamiento del espacio debe hacerse desde antes de iniciar el cultivo. Es necesario que el espacio aunque este en penumbra, exista un reciclamiento de aire porque de lo contrario los hongos también crecerán alargados y deformes (Flores et al., 2012).

La pérdida de agua o transpiración es un proceso fisiológico importante, que afecta las principales características de calidad de setas frescas, tales como el

peso, apariencia y textura. La humedad es la variable con más efecto sobre la tasa de transpiración. La tasa de transpiración está influenciada por factores tales como temperatura, humedad, área de superficie y el movimiento del aire. Los rangos de la transpiración van de 0.14 a 2.5 [mg cm⁻² h⁻¹] (Mahajan et al., 2007).

El efecto de la humedad sobre la transpiración es mayor que el efecto de la temperatura. Los efectos entre la temperatura y la humedad son significativos. Se incrementa la transpiración cuando se aumenta la temperatura; cuando baja la humedad crece la transpiración (Mahajan et al., 2007).

De acuerdo con Ben-Yehoshua (1987) el flujo de agua de vapor a través de la superficie de una fruta es proporcional a la diferencia entre la humedad de la fruta y la humedad de la atmósfera. El comportamiento se da de acuerdo a la ley de Fick de difusión de un gas. Esta ley puede ser aplicada para los hongos seta y se define de la siguiente manera:

$$TR = \rho \times k_i \times (a_{wi} - a_w) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

TR= Transpiración [mg cm⁻² h⁻¹].

ρ = Densidad del agua [mg cm⁻³].

k_i = Coeficiente de transferencia de masa = 0.00885 [cm h⁻¹].

a_{wi} = Actividad del agua en los hongos seta=0.924

a_w = Actividad del agua en el ambiente.

3.3 Psicrometría.

La psicrometría se define como la ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano. Ampliando aún más, incluiríamos el método de controlar las propiedades térmicas del aire húmedo. Lo anterior, se puede llevar a cabo a través del uso de tablas psicrométricas o de la carta psicrométrica (a).

3.3.1 Carta psicrométrica.

Una carta psicrométrica, es una gráfica de las propiedades del aire, tales como temperatura, humedad relativa, volumen, presión, etc. Las cartas psicrométricas se utilizan para determinar, cómo varían estas propiedades al cambiar la humedad en el aire (a).

La carta psicrométrica de la Figura 11 es una gráfica trazada con los valores de las tablas psicrométricas; por lo tanto, la carta psicrométrica puede basarse en datos obtenidos a la presión atmosférica normal al nivel del mar, o puede estar basada en presiones menores que la atmosférica, o sea, para sitios a mayores alturas sobre el nivel del mar (a).

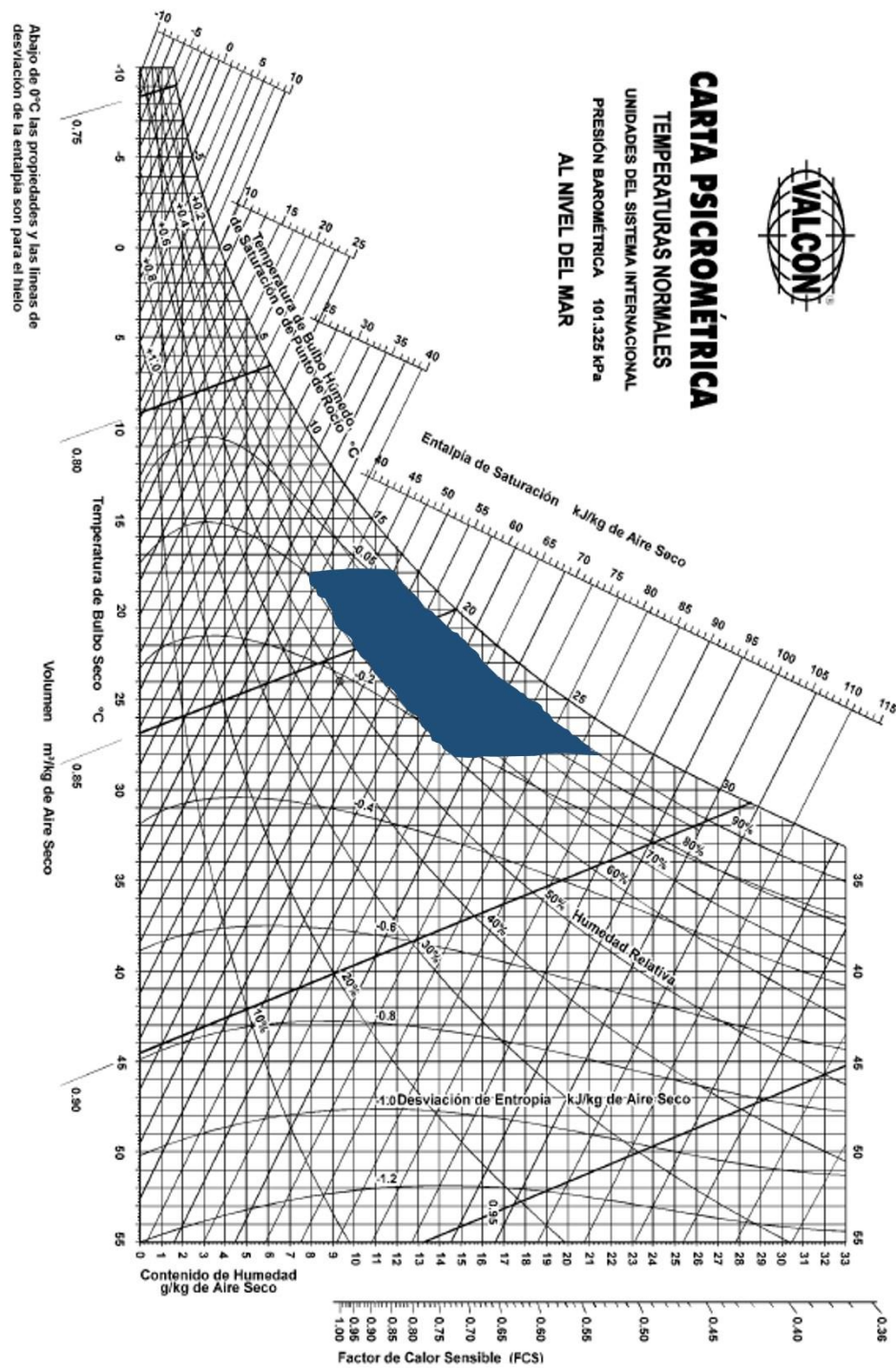


Figura 11. Carta psicrométrica, donde se observa la zona de confort del hongo seta.

Existen muchos tipos de cartas psicrométricas, cada una con sus propias ventajas. Algunas se hacen para el rango de bajas temperaturas, algunas para el rango de media temperatura y otras para el rango de alta temperatura. En algunas de las cartas psicrométricas se les amplía su longitud y se recorta su altura; mientras que otras son más altas que anchas y otras tienen forma de triángulo. Todas tienen básicamente la misma función; y la carta a usar, deberá seleccionarse para el rango de temperaturas y el tipo de aplicación (a). En la carta psicrométrica de la Figura 11 se ha marcado con azul la zona de confort del hongo seta,

1. Temperatura de bulbo seco (bs).

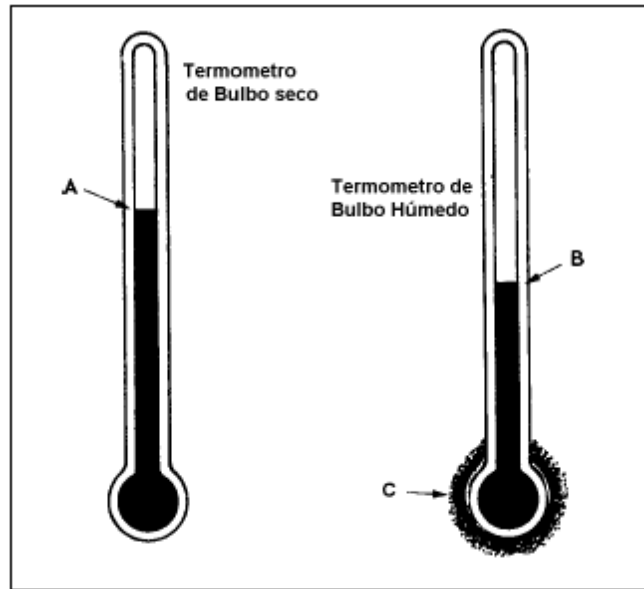
Termómetro de bulbo seco (bs): la temperatura del aire indicada es normalmente la temperatura de “bulbo seco” (bs), tomada con el elemento sensor del termómetro en una condición seca. Es la temperatura medida por termómetros ordinarios en casa (a).

2. Temperatura de bulbo húmedo (bh).

Termómetro de bulbo húmedo (bh): básicamente, un termómetro de bulbo húmedo no es diferente de un termómetro ordinario, excepto que tiene una pequeña mecha o pedazo de tela alrededor del bulbo. Si esta mecha se humedece con agua limpia, la evaporación de esta agua disminuirá la lectura (temperatura) del termómetro. Esta temperatura se conoce como de “bulbo húmedo” (bh). Si el aire estuviese saturado con humedad (100 % de humedad

relativa), la lectura de la temperatura en el termómetro de bulbo húmedo, sería la misma que la del termómetro de bulbo seco. Sin embargo, la humedad relativa normalmente es menor de 100 % y el aire está parcialmente seco, por lo que algo de la humedad de la mecha se evapora hacia el aire. Esta evaporación de la humedad de la mecha, provoca que la mecha y el bulbo del termómetro se enfríen, provocando una temperatura más baja que la del bulbo seco. Mientras más seco esté el aire, más rápida será la evaporación de la humedad de la mecha. Así que, la lectura de la temperatura del bulbo húmedo, varía de acuerdo a qué tan seco esté el aire. La precisión de la lectura del bulbo húmedo, depende de qué tan rápido pase el aire sobre el bulbo. Las velocidades hasta de 1500 m min^{-1} (90 km h^{-1}), son mejores pero peligrosas, si el termómetro se mueve a esta velocidad. También, el bulbo húmedo deberá protegerse de superficies que irradian calor (sol, radiadores, calentadores eléctricos, calderas, etc.). Se pueden tener errores hasta del 15 % si el movimiento de aire es muy lento, o si hay mucha radiación presente. Cuando la humedad relativa es de 100 % (saturación), las temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y del punto de rocío son todas la misma. Abajo de 100 % de humedad relativa, la temperatura del bulbo húmedo es siempre algo menor que la del bulbo seco y mayor que el punto de rocío. En la Figura 12, se ilustran los termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo. "A" representa la temperatura de bulbo seco, "B" la temperatura de bulbo húmedo y "C" la mecha que envuelve al bulbo húmedo. La temperatura de bulbo húmedo varía de acuerdo a la temperatura del cuarto; así que, es afectada tanto por el calor sensible del aire en el cuarto, como por el calor latente de la humedad del

aire. Por lo tanto, la temperatura de bulbo húmedo, es una indicación del calor



total en el aire y la humedad (a).

Figura 12. Tipos de bulbos para medir la temperatura.

3. Temperatura de punto de rocío (pr).

Punto de rocío (pr): es la temperatura debajo de la cual el vapor de agua en el aire, comienza a condensarse. También es el punto de 100 % de humedad. La humedad relativa de una muestra de aire, puede determinarse por su punto de rocío. Cuando se habla de la temperatura de punto de rocío del aire, generalmente, se refiere a su temperatura promedio. Si a una pequeña porción de aire se le remueve calor (se calienta o se enfría), el contenido total de humedad y su temperatura promedio, eventualmente se verán afectadas, después que la circulación del aire lo haya mezclado completamente de nuevo (a).

4. Humedad relativa (hr).

5. Humedad absoluta (ha).

6. Entalpía (H).

La entalpía es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno. Es una función de estado de la termodinámica donde la variación permite expresar la cantidad de calor intercambiado durante una transformación isobárica, es decir, a presión constante en un sistema termodinámico, teniendo en cuenta que todo objeto conocido se puede entender como un sistema termodinámico. Se trata de una transformación en el curso de la cual se puede recibir o aportar energía (por ejemplo la utilizada para un trabajo mecánico). En este sentido la entalpía es numéricamente igual al calor intercambiado con el ambiente exterior al sistema en cuestión (b).

La entalpia es una variable que describe la cantidad de calor sensible y latente en el aire y es calculada con la siguiente ecuación (Schmidt. 2005):

$$H_0 = C_{PL} \times t_a + X_L (C_{PV} \times t_a + r_0) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

H_0 = Entalpia [kJ kg⁻¹].

C_{PL} = Capacidad específica del aire seco [$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$].

t_a = Temperatura del aire [$^{\circ}\text{C}$].

X_L = Contenido de vapor en el aire.

C_{PV} = Capacidad específica del vapor de agua [$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$].

r_0 = Calor específico de vaporización del agua [kJ kg^{-1}].

7. Volumen específico.

Volumen específico [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]: indica el volumen por unidad de masa de aire seco (equivalente al inverso de la densidad del aire) (Both, 2005).

La máxima cantidad dada por el enfriamiento evaporativo depende de la temperatura inicial y la humedad. Se puede medir fácilmente estos parámetros con un termómetro estándar y un sensor de humedad relativa. Con estos parámetros, se puede usar la carta psicrométrica (Both, 2005).

3.4 Automatización del riego.

El riego proporciona a la planta el agua necesaria para su crecimiento y desarrollo. Dada la escasez de agua, es conveniente para la planta pero también para la protección del medio ambiente, que el riego se aplique con la mayor eficiencia. Una de las alternativas para lograr este objetivo es la utilización de sistemas de riego con programación de autocontrol: se trata de sistemas que establecen la ejecución automática de riegos mediante la valoración continua de

uno o varios parámetros de control. Los factores de control pueden ser edáficos (como la humedad), indicadores compuestos que relacionan variables meteorológicas y el cultivo (como la demanda evapotranspirativa), y en general, variables que permitan determinar, en forma continua el momento y cantidad de agua necesaria para un cultivo, de tal forma que el sistema tome decisiones con el apoyo en estos indicadores en tiempo real. Es importante resaltar que la aplicación del agua en términos de cantidad y oportunidad, se debe realizar con precisión en tiempo real (Lugo et al., 2011).

Estos sistemas de control electrónico se encargan de procesar las señales proporcionadas por un conjunto de sensores, los cuales miden diferentes variables del entorno al cual se desea controlar, obteniendo una respuesta ante una determinada situación (López, 2008).

El riego puede apoyarse en sistemas mecánicos integrados por actuadores como bombas eléctricas, bombas de combustión interna, ventiladores y motores de ambos tipos. Los sistemas de automatización para censar y controlar sistemas de riego están integrados por dispositivos semiautomatizados y automatizados como temporizadores o relojes que controlan bombas y otros componentes de riego (Bastida et al., 2006).

En la actualidad, aun cuando la tecnología usada en los sistemas de riego es muy avanzada, los sistemas de irrigación automatizados están diseñados para el monocultivo (Gutiérrez et al., 2007). Algunos ejemplos de sistemas automatizados de riego para monocultivo son medir la conductividad eléctrica del

suelo, o usar como indicador la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire (Noble et al., 2000).

Para diseñar un control integrado de microclima, riego y suministro de nutrientes es necesario desarrollar algoritmos muy complejos (Schmidt, 2005). Con los equipos existentes en el mercado se consiguen diversos niveles de automatización, hasta llegar con el uso de microprocesadores a una programación automática del riego para períodos largos de tiempo, incluyendo la estimación automática de las necesidades de riego (López et al., 1997).

3.5 Redes neuronales.

Las redes neuronales son modelos de caja negra que imitan el comportamiento de las neuronas en el cerebro humano, por lo cual se han denominado redes neuronales artificiales (Collantes, 2001). La Figura 13 muestra los componentes de una neurona.

Las neuronas son células nerviosas que constituyen los elementos primordiales del sistema nervioso central. Son capaces de recibir señales provenientes de otras neuronas, procesarlas, generar pulsos nerviosos, conducir estos pulsos y transmitirlos a otras neuronas (Colina et al, 1998).

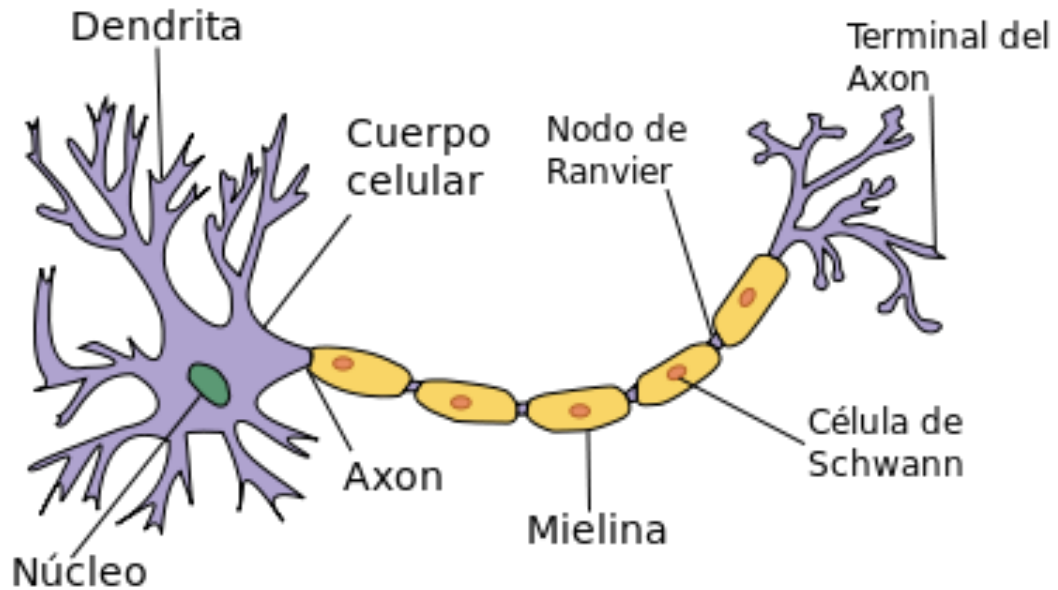


Figura 13. Morfología de una neurona. Fuente: Wikipedia, 2015.

Las dendritas son un árbol de redes receptoras de fibras nerviosas que llevan señales eléctricas al cuerpo de la célula (Hagan et al, 1996).

El cuerpo celular contiene el núcleo, tiene forma esférica y es aquí donde se ejecutan todas las transformaciones necesarias para la vida de la neurona (Colina et al, 1998).

El axón transmite la señal de salida a otras neuronas; el intercambio químico de información entre una neurona y otra se hace a través de la sinapsis (Collantes, 2001).

Los primeros modelos de redes neuronales datan de 1943 por los neurólogos Warren McCulloch y Walter Pitts. Años más tarde, en 1949, Donald Hebb desarrolló sus ideas sobre el aprendizaje neuronal, quedando reflejado en la "regla de Hebb". En 1958, Rosenblatt desarrolló el perceptrón simple, y en 1960,

Widrow y Hoff desarrollaron el adaline, que fue la primera aplicación industrial real (c).

Una neurona artificial es una unidad de procesamiento de información que es fundamental para la operación de una red neuronal (Haykin, 1994). La Figura 14 muestra un modelo de red neuronal en donde pueden identificarse los siguientes elementos (Collantes, 2001).

Entradas: son escalares que se le proporcionan a la red de acuerdo al tema de estudio.

- Capas: también se les denomina capas ocultas o intermedias por encontrarse entre la entrada y la salida de la red. Con frecuencia no es suficiente una sola neurona para resolver un problema, sino que se requiere de varias neuronas que operen en paralelo, lo que se denomina capa, en inclusive pudieran ser necesarias varias capas. A la red con una capa se le denomina unicapa, mientras que a la red con dos o más capas se le llama multicapa.
- Salidas: son los valores que arroja la red como resultado de aprendizaje. El número de salidas de la red dependerá del problema en estudio. La salida deberá estar expresada en la misma escala de los datos originales.
- Pesos sinápticos: son valores numéricos que expresan la importancia de entrada correspondiente. El valor de entrada x_i se dirige a la neurona k multiplicado por el peso w_{ik} (el primer subíndice de los pesos se refiere a la entrada y el segundo a la neurona en cuestión).

- Punto de suma de entradas ponderadas: aquí se realiza la combinación lineal o suma de todas las entradas multiplicadas por sus correspondientes pesos.
- Función de activación: es una función que puede ser lineal o no lineal, que limita el rango de la salida de la neurona.
- Sesgo: valor formado por una entrada fija e igual a 1, denominada x_0 , multiplicada por el peso w_{0k} .

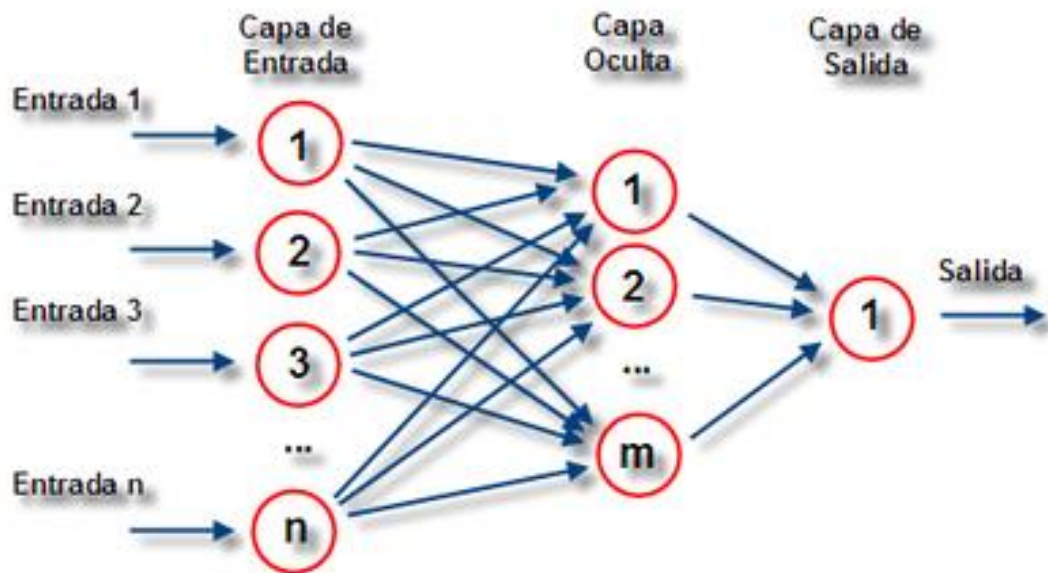


Figura 14. Red neuronal artificial perceptrón multicapa con n neuronas de entrada, m neuronas en su capa oculta y una neurona de escape. Fuente: Wikipedia, 2015.

Las redes neuronales artificiales se pueden clasificar dentro del grupo de sistemas inteligentes, entre los que se encuentran: sistemas adaptables, difusos, genéticos y todos aquellos que tratan de modelar el conocimiento y el aprendizaje. La calificación de inteligentes se debe a que los sistemas mencionados anteriormente tienen la capacidad de adaptarse a su medio o aprender de él de forma autónoma. Las redes neuronales artificiales pueden

definirse como un arreglo de elementos básicos de procesamiento con capacidad de entrenamiento. Este entrenamiento consiste en el ajuste de algunos parámetros con el fin de que la red asimile, con algún grado de precisión, la relación causa-efecto deseada entre las variables de entrada y de salida de la red neuronal (Ortiz, 2008).

Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones (c):

1. Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.
2. Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo en este caso la salida la misma función de propagación.
3. Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función sigmoidea (para obtener valores en el intervalo $(0,1)$) y la tangente hiperbólica (para obtener valores en el intervalo $(-1,1)$).

Entrenamiento y generalización.

Un modelo de red neuronal al ser construido origina dos actividades fundamentales para la posterior utilización: entrenamiento o aprendizaje y generalización o prueba (Collantes, 2001).

El entrenamiento de una red se lleva a cabo mediante una regla o algoritmo de aprendizaje. Este algoritmo es un procedimiento para modificar los pesos de una red y su propósito es entrenar la red para ejecutar alguna tarea (Hagan et al, 1996).

Los términos usados en el entrenamiento son (Collantes, 2001):

- Patrón: es una observación o experimento del conjunto o patrones de entrenamiento.
- Patrones de entrenamiento: son ejemplos o grupos de datos suministrados a la red para su aprendizaje y están compuestos por patrones de entrada y patrones de salida.
- Iteración: es un barrido de todos los patrones del conjunto o patrones de entrenamiento.
- Criterios para detener el entrenamiento: se repiten las iteraciones hasta que el error alcance su valor máximo posible y se alcance un número máximo de ciclos.

Los algoritmos de entrenamiento pueden clasificarse en cuatro tipos:

Supervisados: un maestro guía la red en cada etapa del aprendizaje, indicándole el resultado correcto (Colina et al., 1998). La misión del algoritmo es ajustar los pesos de la red, que dados un conjunto de entradas, las salidas proporcionadas por la red deberán coincidir lo más posible con las salidas especificadas en el patrón de entrenamiento. Algunos ejemplos son: regla de Hebb, aprendizaje de Widrow-Hoff, perceptrón simple, red ADALINE, perceptrón multicapa, algoritmo de retro propagación y la memoria asociativa bidireccional (Collantes, 2001).

No supervisados: los pesos son modificados únicamente en respuesta a las entradas de la red, es decir, no están disponibles las salidas. La mayoría de estos algoritmos tienen como misión realizar un tipo de agrupamiento. Éstos aprenden a categorizar los patrones de entrada en un número finito de clases (Hagan et al., 1996). Algunos ejemplos son: memorias asociativas, redes de Hopfield, la máquina de Boltzmann, la máquina de Cauchy, las redes de resonancia, la regla de Hebb no supervisada y regla de Kohonen (Collantes, 2001).

Redes híbridas: son un enfoque mixto en el que utiliza una función de mejora para facilitar la convergencia. Un ejemplo de este último tipo son las redes de base radial (c).

Aprendizaje reforzado: se sitúa a medio camino entre el supervisado y el auto organizado (c).

Generalización.

Una vez que la red neuronal ha sido entrenada mediante un algoritmo supervisado, esto implica que los pesos de interconexión han sido ajustados de forma que se minimice el error. Esta red deberá estar en capacidad de proveer salidas próximas a los valores deseados cuando se le proporcionan nuevos ejemplos, es decir, entradas que no pertenecen al conjunto de entrenamiento, sino que forman parte de los patrones de prueba (Collantes, 2001).

Para que ocurra una buena generalización deben cumplirse las siguientes condiciones (Collantes, 2001):

- Las entradas de la red deben contener suficiente información en relación con el objetivo o salida deseada, de manera que exista una función matemática que relacione correctamente las salidas con las entradas.
- La función que se trata de aprender, debe ser, en cierto sentido suave. Es decir, cambios pequeños en las entradas producen cambios pequeños en las salidas.
- El número de patrones de entrenamiento deberá ser suficientemente grande y representativo del conjunto de los casos que se quieren generalizar.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1 Justificación del problema.

Para conocer el proceso de siembra y del cultivo de los hongos seta, se visitaron dos plantas de producción en la periferia de Texcoco. Las instalaciones visitadas se encuentran en Santiago Cuautlalpan y Colonia Bellavista, ambas localizadas en el municipio de Texcoco Estado de México. La primer instalación es una nave con medidas aproximadas de 20 m de largo, 10 m de ancho, tiene muros de tabique, cuenta con extractores de aire, el techo es de lámina galvanizada, el sistema de riego con el que cuenta la primera instalación es sistema de aspersión; en esta nave el acomodo de las bolsas es por medio de ganchos. La segunda nave de producción cuenta con un espacio de 10 m de largo por 4 m de ancho, tiene muros de tabique, dicho espacio está dividido en dos partes; la zona de siembra y la zona de incubación. En la zona de siembra hay una mesa, tiene un tambo para remojar la paja, así como un quemador para pasteurizar el sustrato, cuenta con piso firme de concreto, techos de lámina galvanizada, ventanas para la ventilación. En la zona de incubación hay estantes para el acomodo del hongo seta. En esta nave de producción se usa el sistema de nebulizador.

En estas plantas de producción se encontró que no hay un sistema de riego automático para el cultivo de setas. Los riegos se dan por experiencia de los productores, generalmente dos o tres riegos al día en meses en los que la temperatura es elevada.

4.2. Experimento.

Se adecuó un espacio de 9 m³ para poder producir el hongo seta ubicado en Av. Úrsulo Galván # 8, Texcoco, Estado de México. La Figura 15 muestra la ubicación de la unidad de producción. Este inmueble está hecho con muros de tabique, piso firme de concreto, techo de lámina de cartón, tiene tres ventanas, una puerta. Se le cambió el techo, se le puso puerta y se le tapó el acceso principal con láminas de cartón para que no entrara luz. A las ventanas se les puso malla fina para impedir el paso de mosquitos, de la misma manera se les colocó madera para impedir el paso de la luz. La Figura 16 muestra los trabajos realizados en el espacio

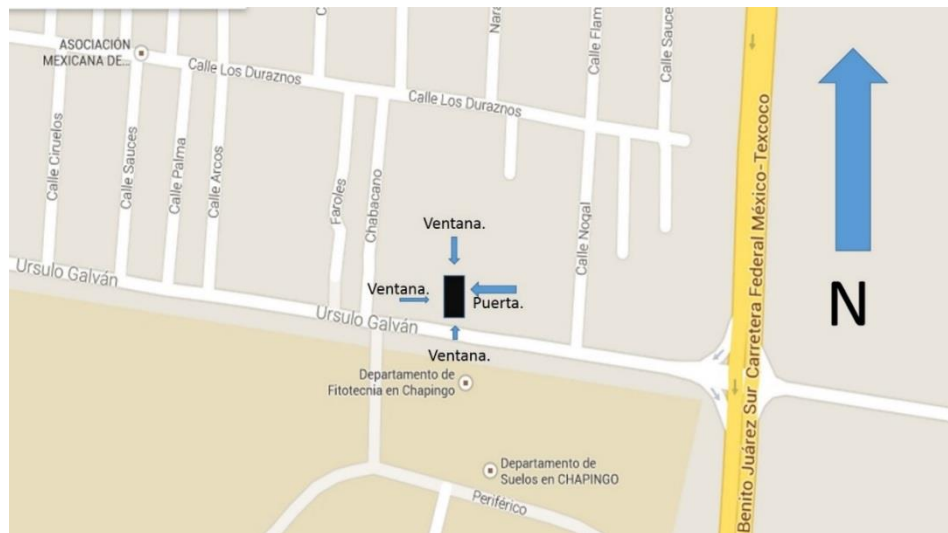


Figura 15. Ubicación de la unidad de producción de hongo seta. Fuente: Autor 2015.



Figura 16. Adecuación del inmueble donde se realizaron los experimentos de siembra. Fuente: Autor, 2015.

Posteriormente se instaló el sistema de control (hardware libre) de sensores, adquisición de datos, encendido y apagado del sistema de nebulización y colocación del mismo.

El sistema de control tiene los siguientes componentes:

- Microprocesador ARDUINO ATMEGA 2560®.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios, la Figura 17 muestra el arduino. Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse

sin necesidad de conectar a un ordenador. También cuenta con su propio software que se puede descargar de su página oficial que ya incluye los drivers de todas las tarjetas disponibles lo que hace más fácil la carga de códigos desde el computador (d).

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el Atmega 2560. Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware puertos serie), un oscilador de cristal de 16 MHz, conexión USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; conectarlo a un ordenador con un cable USB o a la corriente eléctrica con un adaptador de corriente alterna (e).



Figura 17. Arduino ATMEGA 2560. Fuente: Wikipedia, 2015.

- Sensores DHT11®.

La Figura 18 muestra el sensor DHT11, este es un sensor de humedad y temperatura, de bajo costo y de media precisión. Entre sus ventajas podemos mencionar el despliegue de datos digitales, esto supone una gran ventaja frente a los sensores del tipo análogo. El sensor DHT11 solo lee enteros, no puede leer temperaturas con decimales (f).

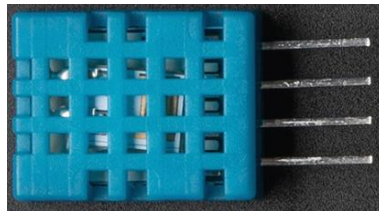


Figura 18. Sensor DHT 11. Fuente: Autor, 2015.

- Display LCD 16X2®.

Esta pantalla sirve para visualizar los datos obtenidos por los sensores en tiempo real. La Figura 19 muestra el Display usado en el sistema.



Figura 19. Display usado en el sistema de adquisición de datos. Fuente: Autor, 2015.

- Reloj RTC®.

Un Reloj en tiempo real (en inglés, real-time clock, RTC) es un reloj de un ordenador, incluido en un circuito integrado, que mantiene la hora actual. Los RTC están presentes en la mayoría de los aparatos electrónicos que necesitan guardar el tiempo exacto (g). La Figura 20 muestra un reloj RTC.

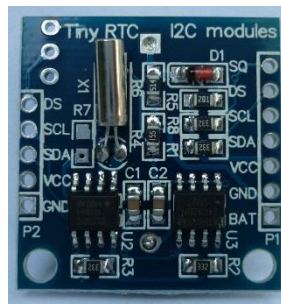


Figura 20. Reloj RTC usado en el sistema de adquisición de datos. Fuente: Autor, 2015.

- Tarjeta de memoria SD ®.

La Figura 21 muestra la tarjeta de memoria SD, que es un dispositivo que sirve para el almacenamiento de los datos obtenidos por los sensores.



Figura 21. Tarjeta de memoria SD. Fuente: Autor, 2015.

- Relevador compacto de 1 polo, 2 tiros, y bobina de 12 Vcc, 10 A ®.
- Transistor 2N2222 ®.

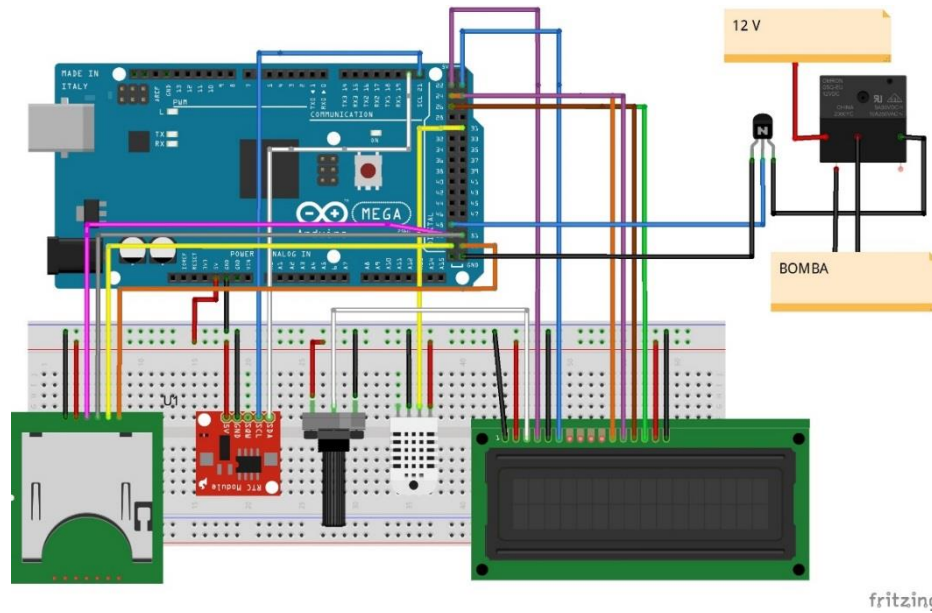


Figura 22. Diagrama de instalación del sistema de adquisición de datos, encendido y apagado del sistema nebulizador. Fuente: Autor, 2015.

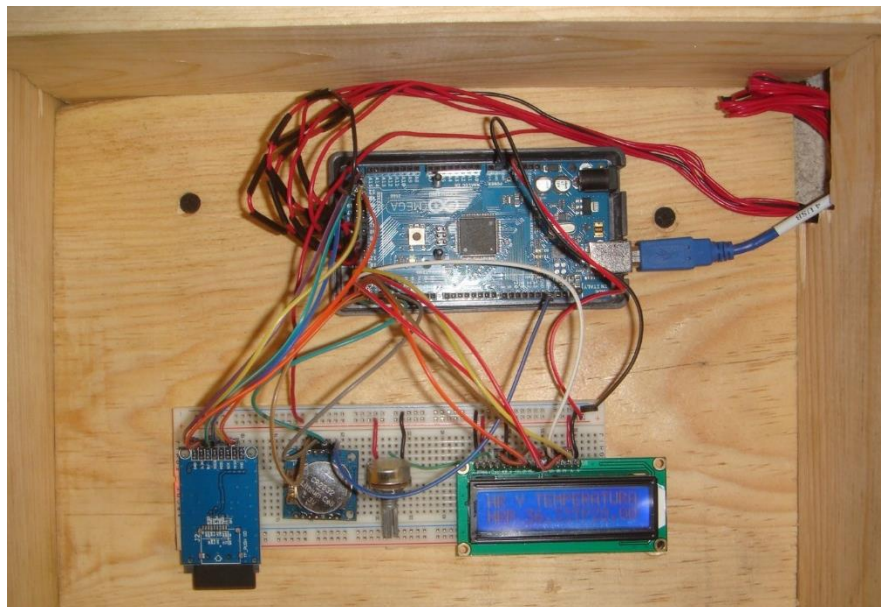


Figura 23. Sistema integrado para la adquisición de datos de los sensores. Fuente: Autor, 2015.

Las Figuras 24, 25, 26 y 27 son los componentes del sistema nebulizador.



Figura 24. Bomba de ½ HP. Fuente: Autor, 2015.



Figura 25. Filtro en línea del sistema nebulizador. Fuente: Autor, 2015.



Figura 26. Nebulizadores de 9 lpm. Fuente: Autor, 2015.



Figura 27. Depósito de agua con capacidad de 400 litros. Fuente: Autor, 2015.

4.3 Funcionamiento del sistema de riego automático.

Seis sensores de humedad relativa y temperatura DHT11®, fueron instalados en el inmueble donde se cultivará el hongo seta, el arreglo de los sensores dentro del espacio está dado por la Figura 28.

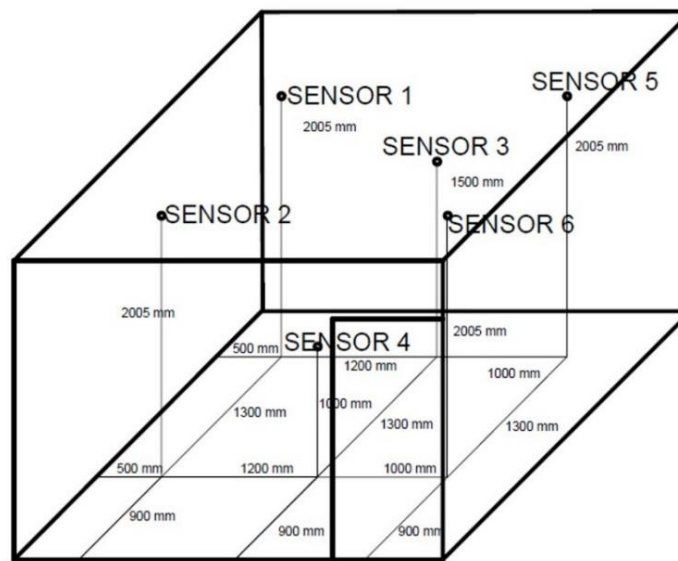


Figura 28. Arreglo de los sensores dentro del inmueble. Fuente: Autor, 2015.

Los sensores de la Figura 29 miden la temperatura y humedad relativa del aire cada minuto; los datos obtenidos son enviados al microprocesador Arduino®, el cual se encarga de guardarlos en la memoria SD®.

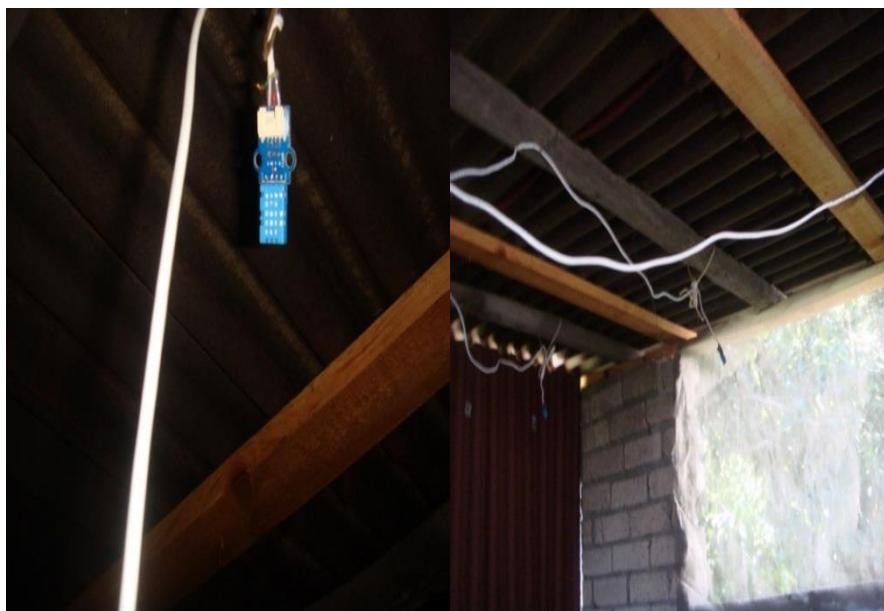


Figura 29. Sensores DHT11 dentro de la unidad de producción. Fuente: Autor, 2015.

El encendido y apagado del sistema de riego es comandado por las lecturas que dan los sensores de temperatura y humedad relativa DHT11®. Puesto que el hongo seta tiene un rango óptimo de humedad relativa de 60 a 80 %. Se han fijado estos valores como limites inferior y superior respectivamente; para que, cuando la lectura de los sensores sea menor de 60 % se encienda el sistema de riego con la señal que los sensores emiten; de la misma manera, cuando pase la lectura de 80 %, los sensores envíen la señal a través del circuito eléctrico de relevador y transistor para que apague el sistema. Este sistema, funciona el tiempo que indican los sensores, es decir, prende y apaga basado en la señal enviada. La Figura 30 muestra el sistema nebulizador en operación. La programación de los sensores, lcd, reloj, encendido y apagado del sistema de riego en la plataforma ARDUINO® se presenta en anexos.



Figura 30. Sistema de nebulización funcionando en la unidad de producción. Fuente: Autor, 2015.

4.4 Sembrado del hongo seta en el sustrato.

Para la siembra del hongo seta es necesario que las instalaciones se encuentren en condiciones de asepsia, libres de agentes contaminantes, se desinfecten con agua y cloro. El personal que siembre el micelio, debe estar aseado, con cubre boca, cubre pelo, bata y se haya desinfectado las manos con alcohol.

Los materiales a utilizar para el sembrado se enlistan a continuación:

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| ▪ Paca de cebada. | ▪ Masquin y despachador. |
| ▪ Bolsas de polipapel. | ▪ Marcador indeleble. |
| ▪ Micelio. | ▪ Cloro. |
| ▪ Bata. | ▪ Agua. |
| ▪ Cubre boca. | ▪ Alcohol del 96. |
| ▪ Cubre pelo. | ▪ Jabón. |
| ▪ Toallas faciales. | ▪ Ligas. |

El primer paso para sembrar el hongo seta, es eliminar de impurezas y microorganismos que puedan existir en el sustrato que se va a emplear. Esto se logra colocando el sustrato en una bolsa de tela que deje pasar el agua. Posteriormente se introduce esta bolsa con el sustrato en una arpilla de forma cilíndrica, que a su vez se meterá al tambo de 200 litros para su pasteurización. Debajo de la base donde se encuentre el tambo, debe haber un quemador.

Se llena el tambo de 200 litros con agua, dejándose remojar 24 horas. Pasadas las 24 horas se drena el tambo donde se encuentra el sustrato. Se deja aproximadamente 20 o 30 litros dentro del tambo. Se enciende el quemador, con la flama y la poca agua que está contenida en el tambo se procederá a la desinfección. Se deja calentar el tambo bajo la flama por un espacio de una hora hasta que la temperatura en el interior del tambo sea de 80 °C. Una vez realizado este paso, se apaga la parrilla y se deja enfriar 24 horas. La Figura 31 muestra los pasos realizados previos a la siembra del hongo seta.



Figura 31. Proceso de pasteurización del sustrato. Fuente: Autor, 2015.

Pasadas 24 horas es tiempo de sembrar, el personal que siembre debe estar aseado, cubrir la boca y pelo con un protector, usar bata y desinfectarse las manos con alcohol del 96°. El espacio de siembra debe estar limpio y desinfectado. Se pone la bolsa de tela con su contenido sobre una mesa, se corrobora que la humedad del sustrato sea la adecuada, haciendo una prueba.

Se toma con la mano un poco de sustrato y se exprime; si al momento de exprimir no sale o cae agua, el sustrato está listo para usarse en la siembra. De lo contrario, debe dejar que pase un periodo de tiempo hasta que se drene completamente.

Una vez confirmado que el sustrato está en su punto para la siembra. El contenido de la bolsa de tela se esparce sobre la mesa. Cuando el sustrato está en la mesa, se coloca una capa de sustrato en la bolsa de polipapel, posteriormente se procede a inocular esta capa con el micelio que se obtuvo del laboratorio, o se compró en un lugar especializado. Una vez que se ha colocado suficiente micelio sobre la capa, se procede a poner otra capa de sustrato (igual que la anterior), así tapando el micelio. En esta capa, se vuelve a sembrar con el micelio. Una vez más, se coloca una capa de sustrato para tapar el micelio. Nuevamente se coloca el micelio sobre la capa de sustrato que se colocó en la bolsa, se le pone otra capa de sustrato. Cuando se ha llenado la bolsa, se procede a cerrar ésta con la liga, para que no entre alguna impureza o alguna plaga y pueda contaminarse. Este procedimiento se repite una y otra vez, hasta que se ha acabado el sustrato pasteurizado.

El siguiente paso es hacer cuatro aberturas en la bolsa de plástico ya sembrada, a cada abertura se le coloca una toalla facial pegada con masking tape, esta abertura se hace para que entre aire en la bolsa y pueda haber respiración del micelio, sin tener el riesgo de alguna contaminación. Después se pone la fecha de siembra en la bolsa con plumón indeleble, seguido del número de bolsa dentro del lote y la cepa que se ha utilizado para la siembra.

Cuando se ha terminado con el rotulado en las bolsas. El siguiente paso es colocar las bolsas sembradas en un lugar oscuro con suficiente ventilación por un tiempo aproximado de veinte días a este lapso de tiempo se le conoce como incubación. La Figura 32 muestra el proceso de siembra del hongo seta.



Figura 32. Siembra del micelio en el sustrato. Fuente: Autor, 2015.

La Figura 33 muestra la incubación, donde es necesario revisar cada día las bolsas sembradas en búsqueda de alguna enfermedad o alguna característica que sea ajena a la siembra.



Figura 33. Incubación del micelio. Fuente: Autor, 2015.

La Figura 34 muestra los brotes de los primordios, pasados veinte días desde la siembra, estos primordios son síntoma que la siembra se realizó de forma correcta y no hubo infección en el cultivo.



Figura 34. Producción del hongo seta. Fuente: Autor, 2015.

Cuando han aparecido los primordios es tiempo de aplicar los riegos para tener las condiciones de humedad relativa óptimas para que el hongo seta de su mejor rendimiento. A partir de este momento es necesario usar el sistema de nebulización que se ha diseñado para las necesidades del hongo seta.

4.5 Diseño experimental.

Para poder conocer los efectos del sistema automático nebulizador en el cultivo del hongo seta, y mantener las condiciones óptimas de humedad relativa de las setas; se realizaron dos experimentos. Cada uno con duración de 51 días, desde la siembra hasta la última cosecha. Durante este periodo de tiempo los sensores del sistema registraron lecturas de temperatura y humedad relativa, en un principio se tomaron en intervalos de cinco minutos, después se registraron a cada minuto.

El primer experimento es sin usar el sistema de riego, esto es para tener testigo, y probar si el uso del sistema nebulizador genera mejores rendimientos. El período comprendido es del 11 de marzo al 30 de abril del 2015. El segundo experimento es fijando los límites inferior y superior para que prenda y apague el sistema nebulizador en 65 y 85 % de humedad relativa respectivamente. El período del segundo experimento es del 14 de mayo al 27 de junio del 2015. El sistema de riego se usó del 7 de junio al 27 de junio del año 2015. Para evitar un consumo alto en agua y energía, el sistema de riego funciona de 12 pm a 6 pm en los experimentos dos y tres.

4.6 Análisis de los datos obtenidos.

Con los datos obtenidos de la investigación y el programa MATLAB®, se hicieron graficas de temperatura y humedad relativa de cada sensor y cada experimento; esto con la finalidad de observar y estudiar la distribución y comportamiento de estas variables en el interior de la nave de producción. Se calculó la entalpía y

transpiración con los datos obtenidos de cada sensor y cada experimento. Los datos usados son del periodo 11 de marzo al 30 de abril del 2015, 7 de junio al 27 de junio del 2015.

Se calculó la entalpia y transpiración con las ecuaciones 1 y 2 para los sensores que dieron mejores resultados. Se trató de encontrar una relación entre transpiración y rendimiento.

Para la estimación y predicción de temperatura y humedad relativa en diferentes puntos espaciales de la unidad de producción, así como zonas cercanas al lugar donde se realizó el experimento. Se diseñó un sistema basado en modelos de redes neuronales artificiales. En la construcción de la red neuronal se usaron datos de la estación meteorológica automática Chapingo. La red neuronal se construyó para el experimento dos, que fue donde se usó el sistema nebulizador automático.

La red neuronal tiene siete capas de entrada y dos de salida; la cantidad de capas ocultas se da con los diferentes criterios: a. $2n+1$, b. $n=m$, c. $\sqrt{nm}$. La Figura 35 representa la red neuronal, donde se muestra la cantidad de variables de entrada, el número de entradas y las variables de salida.

Evaluación de las redes neuronales. ¿Qué tan bien se ajusta el modelo a los datos?

Las gráficas son de gran ayuda en la evaluación del modelo, pero también es necesario un resumen cuantitativo de la bondad de ajuste. Posiblemente el más usado es el error cuadrado medio (ECM), definido como:

$$ECM = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots (3)$$

Donde, y_i es el valor medido, $\hat{y}_i$ es el valor simulado y n es el número de patrones de datos.

Debido a que ECM es un promedio de las diferencias al cuadrado, grandes diferencias son ponderadas. Es necesario comprobar si ECM no se debe a una o dos grandes diferencias.

A menudo es más conveniente trabajar con la raíz cuadrada del ECM, llamada raíz del error cuadrático medio (RECM), que se define como:

$$RECM = \sqrt{ECM} \dots\dots\dots (4)$$

Otra medida de evaluación es la raíz relativa del error cuadrático medio, definido como:

$$RRECM = \frac{RECM}{\bar{y}} \dots\dots\dots (5)$$

Donde, $\bar{y}$ es el promedio de los valores medidos; esta medida es adimensional y expresa el error como una fracción del valor promedio medido.

El error absoluto medio EAM es una medida que al igual que el ECM evita la compensación entre la comprensión y el exceso de predicción, el cual es definido mediante:

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \dots \dots \dots (6)$$

También podemos encontrar el error absoluto medio relativo EAMR, definido como:

$$EAMR = \frac{EAM}{\frac{1}{n} \sum |y_i|} \dots \dots \dots (7)$$

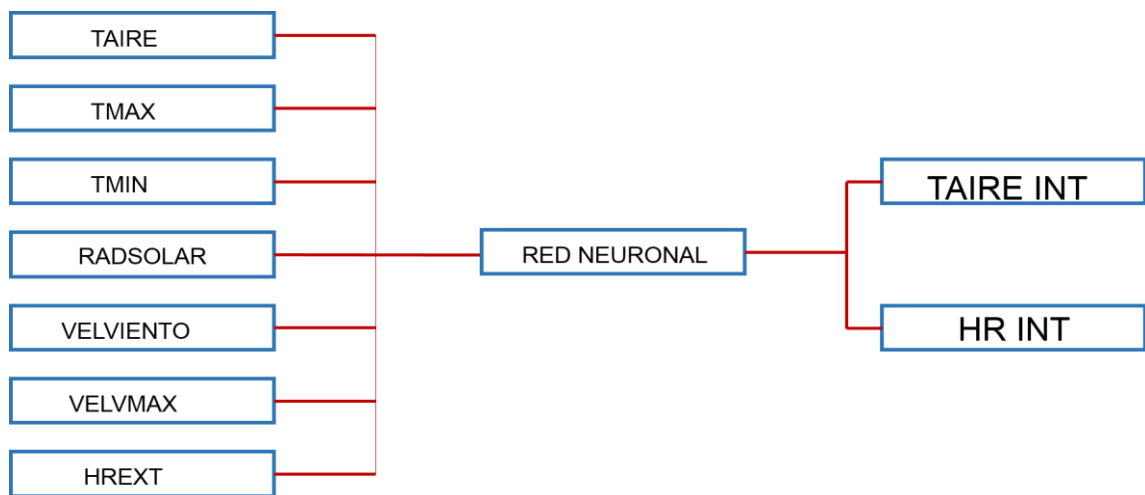


Figura 35. Variables de entrada y salida de la red neuronal artificial.

4.7 Análisis económico.

Para saber si es redituable el sistema de nebulización, es necesario hacer un análisis de costos y contrastarlo con el rendimiento del hongo seta.

Cuadro 2. Gastos fijos para la siembra del hongo seta. Fuente: Autor, 2015.

Sistema de adquisición de datos.	\$3,351.92
Sistema de riego.	\$2,974.00
Mueble para hongos.	\$3,564.58
Total.	\$9,890.50

Cuadro 3. Gastos variables para sembrar hongo seta. Fuente: Autor, 2015.

Paca de cebada, 20 kilogramos.	\$ 50.00
Micelio, dos kilogramos.	\$ 120.00
Agua y luz.	\$ 360.00
Gas.	\$ 50.00
Toallas faciales.	\$ 30.00
Bisturí.	\$ 20.00
Cubre bocas.	\$ 10.00
Cubre pelo.	\$ 10.00
Alcohol 96°.	\$ 30.00
Masquin, ligas, marcador indeleble.	\$ 45.00
Cloro.	\$ 20.00
Jabón.	\$ 25.00
Bolsa polipapel 50 X 70 cm.	\$ 40.00
Total.	\$ 810.00

El gasto de agua se da de la siguiente forma: se tiene 4 nebulizadores con gasto de 9 l h^{-1} cada uno; de esta forma se gastan 36 l h^{-1} ; el sistema trabaja 8 horas al día, así, se tiene un gasto de 288 l al día, este valor se multiplica por la eficiencia del riego de 70 %, dando como resultado 201.6 l al día; el sistema de riego trabaja 30 días por cada periodo de siembra, así, se tiene un consumo de 6048 l por periodo de siembra. Por cada metro cúbico de agua se paga \$10 MN, así el gasto de agua es de \$60 MN en cada período de siembra. Para conocer el consumo de energía eléctrica se comparó el recibo del mes del periodo con lo de los años anteriores y de ahí se obtiene el gasto de \$300 MN por cada periodo de siembra.

5. RESULTADOS.

Una parte importante en el experimento es conocer la cantidad producida. Las fechas de cosecha y el rendimiento obtenido de hongo seta en cada experimento se presenta en los Cuadros 4, 5 y 6.

Cuadro 4. Producción de hongo seta en experimento 1.

Fecha.	Bolsa 1.	Bolsa 2.	Bolsa 3.	Bolsa 4.	Bolsa 5.
09-abr-15	1260				
12-abr-15			630	1305	1005
14-abr-15		1080			
16-abr-15			720		1089
18-abr-15	429	614	774	679	770
26-abr-15		800		455	
Subtotal [g].	1689	2494	2124	2166	2864
Total [g].	11337				

Cuadro 5. Producción del hongo seta en el experimento 2.

Fecha.	Bolsa 1.	Bolsa 2.	Bolsa 3.	Bolsa 4.	Bolsa 5.
07-jun-15	1695	1475			
09-jun-15			1400	1540	
10-jun-15		155	570		855
16-jun-15	651	626	486	721	
27-jun-15	880	730		80	1026
Subtotal [g].	3226	2986	2456	2341	1881
Total [g].	12890				

El Cuadro 6 muestra el rendimiento total obtenido de hongo seta en cada experimento realizado.

Cuadro 6. Producción total de hongo seta en cada experimento.

	Experimento 1.	Experimento 2.
Control de humedad relativa.	Testigo.	65-85 %
Rendimiento [g].	11337	12890
% de Rendimiento.		13.69%

El Cuadro 6 indica que el experimento donde se obtuvo mayor rendimiento fue el experimento dos, donde se controló la humedad relativa en 65-85 %, seguido del experimento uno que fue el testigo.

Al inicio del experimento se presentó el problema con la regulación en la toma de datos, lo cual es notorio en el experimento uno. Se muestra como ejemplo el sensor tres en el que del 11 de marzo del 2015 al 5 de abril del 2015 se tomaron datos cada diez minutos, posterior a esta fecha se corrigió el problema programando el sistema automático para que registrará cada minuto las lecturas en los tres experimentos. Las Figuras 36 y 37 muestran el comportamiento de temperatura de los dos experimentos antes y después de corregir el problema de tomar las lecturas de diez minutos a un minuto. Las Figuras 38 y 39 muestran el comportamiento de humedad relativa de los dos experimentos antes y después de corregir el problema de la toma de lecturas.

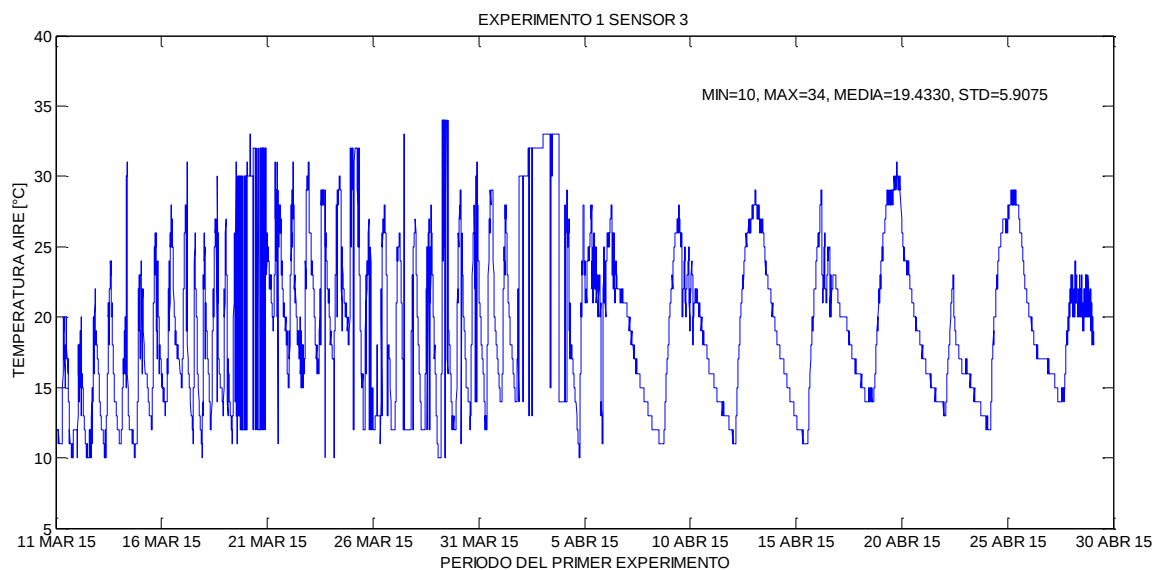


Figura 36. Comportamiento diario de temperatura experimento 1 sensor 3.

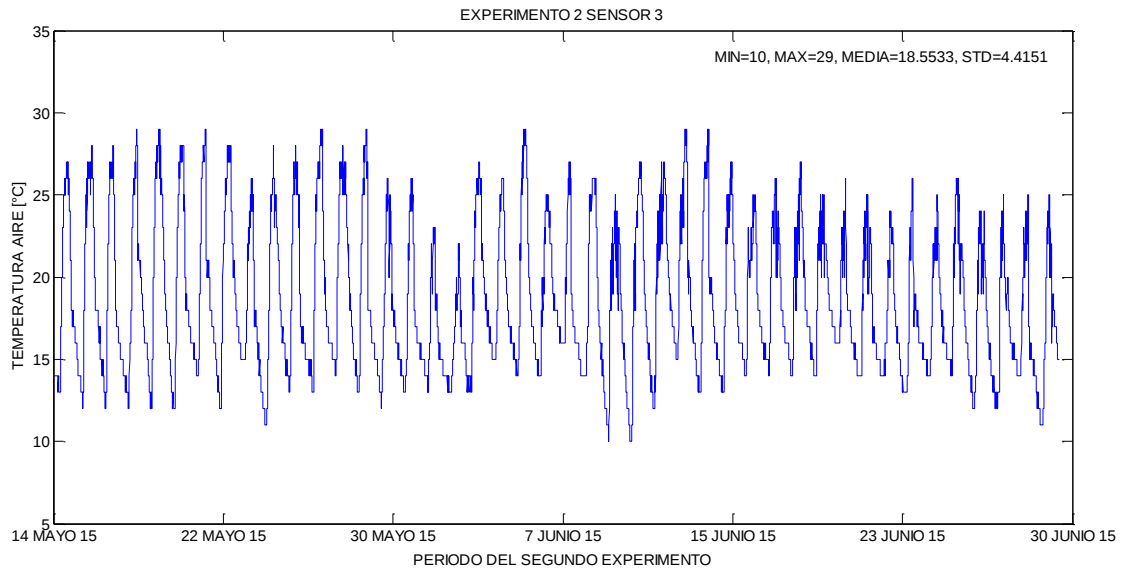


Figura 37. Comportamiento diario de temperatura experimento 2 sensor 3.

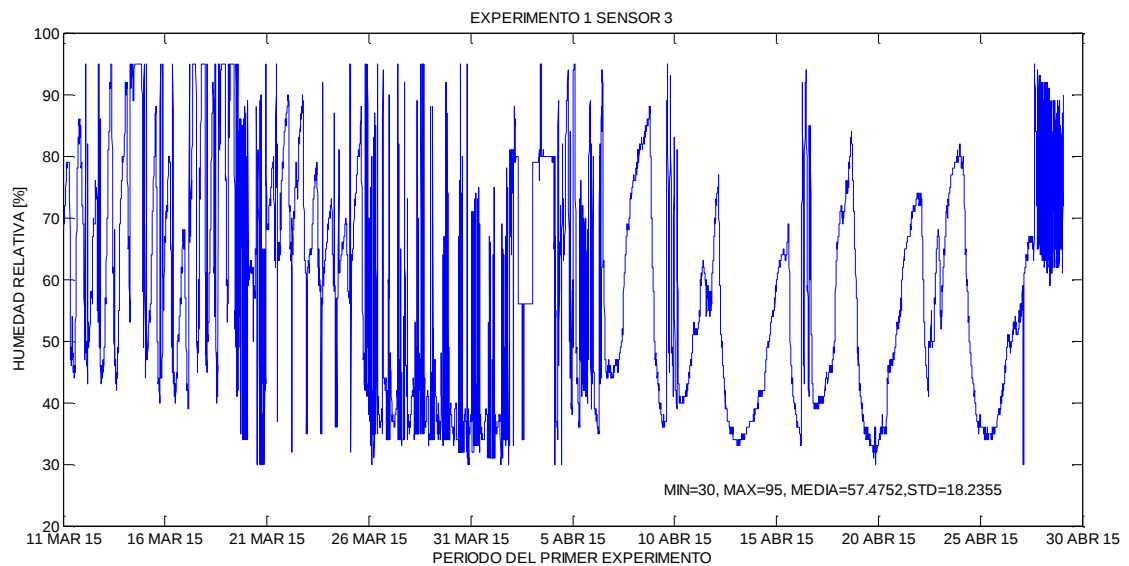


Figura 38. Comportamiento diario de humedad relativa experimento 1 sensor 3.

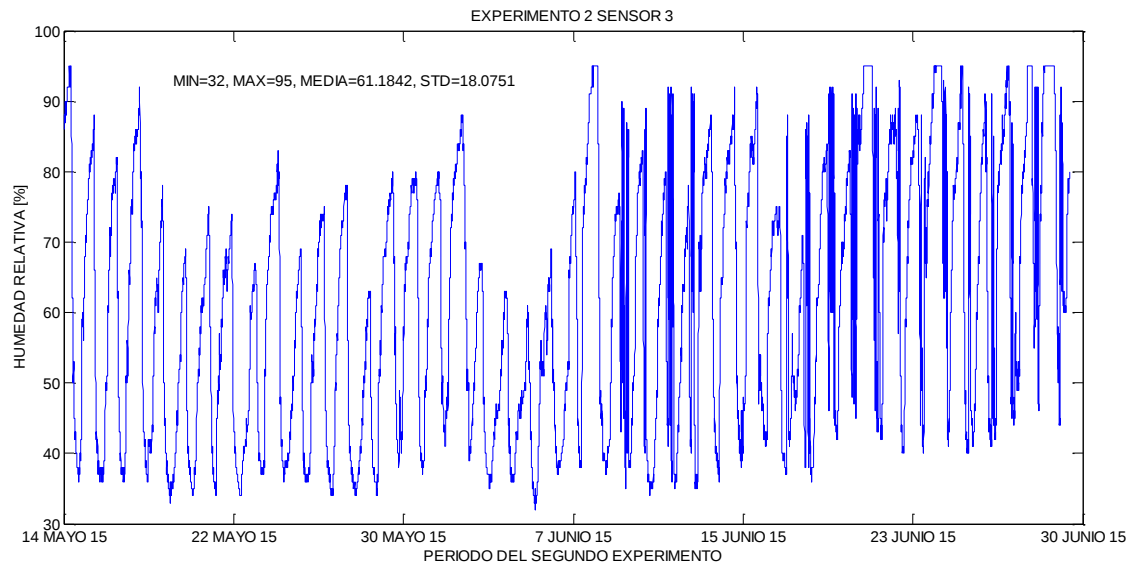


Figura 39. Comportamiento diario de humedad relativa experimento 2 sensor 3.

Como se mencionó anteriormente, la zona de confort del hongo seta está entre 18-28 °C y 60-80 % de humedad relativa. Las Figuras 40 y 41 presentan la distribución de temperatura y humedad relativa del promedio de los seis sensores en los dos experimentos, el rectángulo color magenta indica la zona de confort del hongo seta.

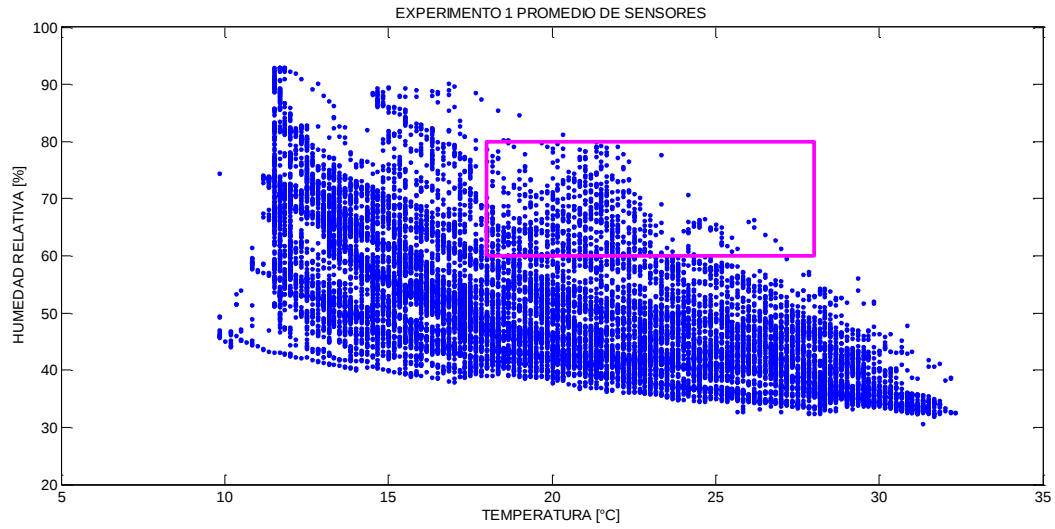


Figura 40. Distribución de temperatura y humedad relativa del promedio de los sensores del experimento 1.

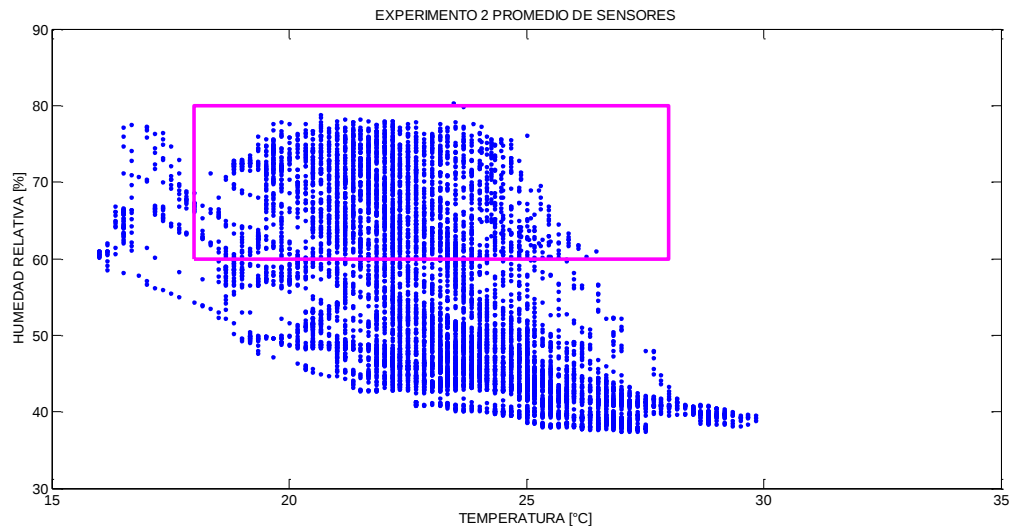


Figura 41. Distribución de temperatura y humedad relativa del promedio de los sensores del experimento 2.

Otro aspecto importante a considerar en este análisis de datos, es la entalpía. La entalpía se compone calor sensible que varía con la temperatura del ambiente, y de calor latente el cual varía de acuerdo a la cantidad de humedad relativa del ambiente. El análisis de la entalpía se realizó usando la ecuación 2 para los sensores 3,4 y 5 que han presentado mejores resultados para la zona de confort del hongo seta. El Cuadro 7 muestra los resultados obtenidos de entalpía para la zona de confort del hongo seta, mientras que el Cuadro 8 muestra los resultados de entalpía para los sensores 3, 4 y 5.

Cuadro 7. Entalpía calculada para la zona de confort del hongo seta con la ecuación 2.

Temperatura del aire. °C	Humedad relativa. %	Calor sensible. kJ kg ⁻¹	Calor latente. kJ kg ⁻¹	Entalpía. kJ kg ⁻¹
18	60	18.11	19.24	37.34
18	80	18.11	25.65	43.75
28	60	28.17	35.49	63.66
28	80	28.17	47.32	75.49

De acuerdo al Cuadro 7, el calor sensible varia en 10.06 kJ kg⁻¹ en los rangos de temperatura de la zona de confort del hongo seta; el calor latente varia 28.08 kJ kg⁻¹ en 20 % de humedad relativa. Se puede apreciar que se debe tener mayor cuidado en cuidar los valores del calor latente.

Los valores calculados del Cuadro 8, fueron obtenidos con los datos máximos y mínimos de temperatura asociados a valores de humedad relativa registrados en ese momento por los sensores, seguidos de los valores máximos y mínimos de humedad relativa asociados a valores de temperatura registrados en ese momento por los sensores.

Cuadro 5. Entalpia calculada para los sensores 3, 4 y 5 en cada experimento.

		Temperatura	Humedad	Calor	Calor	Entalpia
		°C	relativa	sensible	latente	
			%	kJ kg^{-1}	kJ kg^{-1}	kJ kg^{-1}
Experimento 1	Sensor 3	34.00	41.00	34.21	34.29	68.50
	Sensor 3	10.00	34.00	10.06	6.45	16.51
	Sensor 3	14.00	95.00	14.08	23.53	37.61
	Sensor 3	14.00	30.00	14.08	7.43	21.51
	Sensor 4	35.00	38.00	35.22	33.62	68.83
	Sensor 4	8.00	33.00	8.05	5.46	13.51
	Sensor 4	28.00	95.00	28.17	56.19	84.36
	Sensor 4	13.00	35.00	13.08	8.12	21.19
	Sensor 5	36.00	32.00	36.22	29.94	66.16
	Sensor 5	8.00	88.00	8.05	14.57	22.61
	Sensor 5	17.00	95.00	17.10	28.57	45.67
	Sensor 5	21.00	30.00	21.12	11.61	32.74
	Sensor 3	29.00	34.00	29.18	21.33	50.50
Experimento 2	Sensor 3	10.00	80.00	10.06	15.18	25.24
	Sensor 3	16.00	95.00	16.09	26.79	42.89
	Sensor 3	29.00	32.00	29.18	20.07	49.25
	Sensor 4	31.00	38.00	31.19	26.78	57.96
	Sensor 4	10.00	79.00	10.06	14.99	25.05
	Sensor 4	19.00	95.00	19.11	32.45	51.56
	Sensor 4	30.00	34.00	30.18	22.61	52.79
	Sensor 5	31.00	89.00	31.19	62.71	93.90
	Sensor 5	10.00	87.00	10.06	16.51	26.56
	Sensor 5	17.00	95.00	17.10	28.57	45.67
	Sensor 5	29.00	36.00	29.18	22.58	51.76

Los datos remarcados en color amarillo del Cuadro 8 se encuentran fuera de la zona de confort del hongo seta. Estos resultados se dan porque se calcularon para los valores mínimos y máximos de temperatura y humedad relativa registrados por los sensores.

De la Figura 42 a la Figura 47 se muestra el comportamiento de temperatura, humedad relativa y entalpia para los experimentos 1 y 2 y los sensores 3,4 y 5.

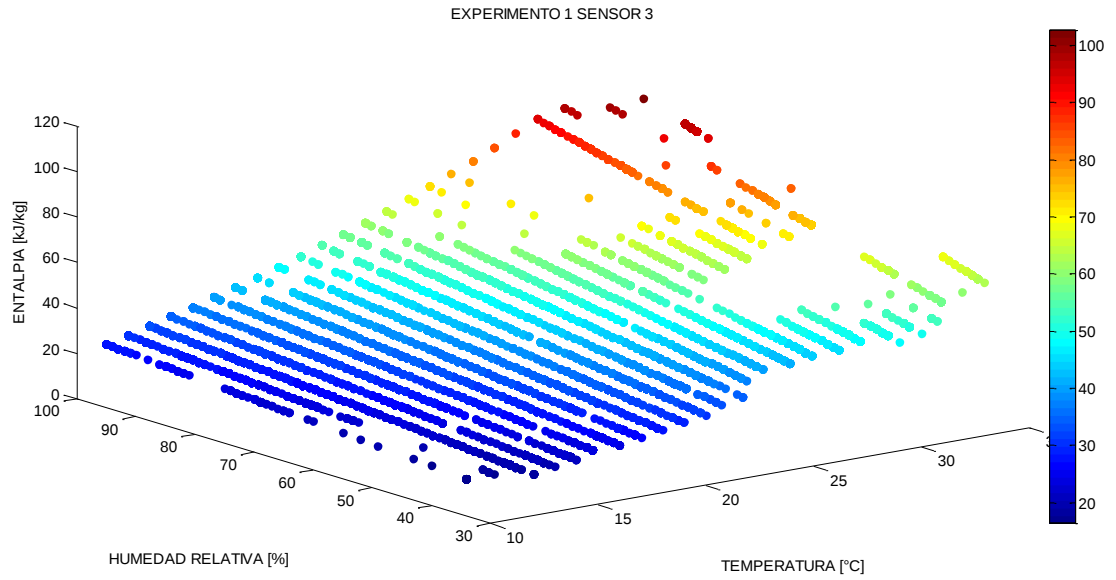


Figura 42. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 3.

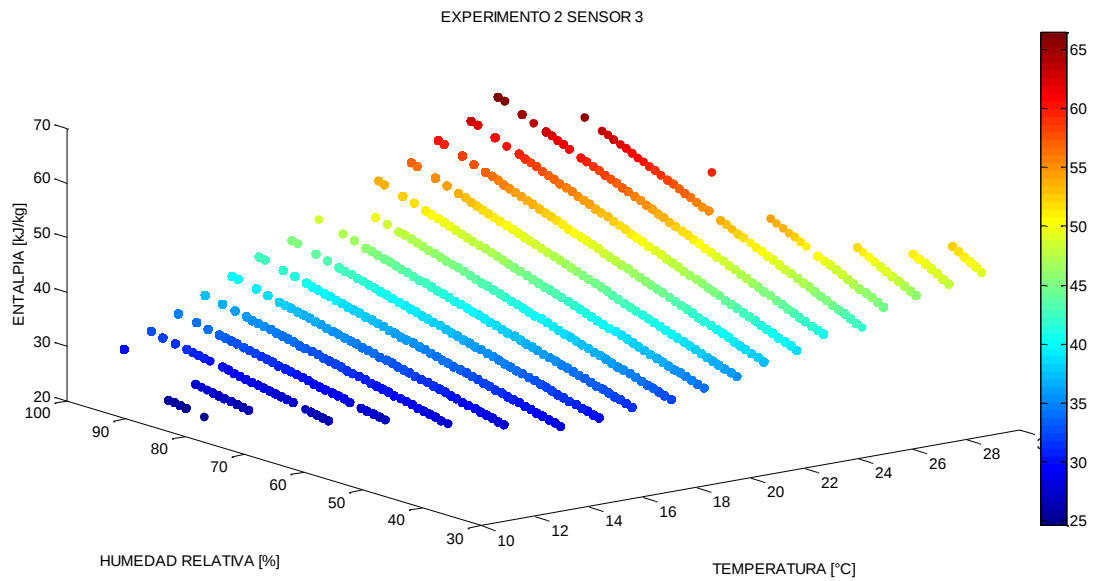


Figura 43. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 3.

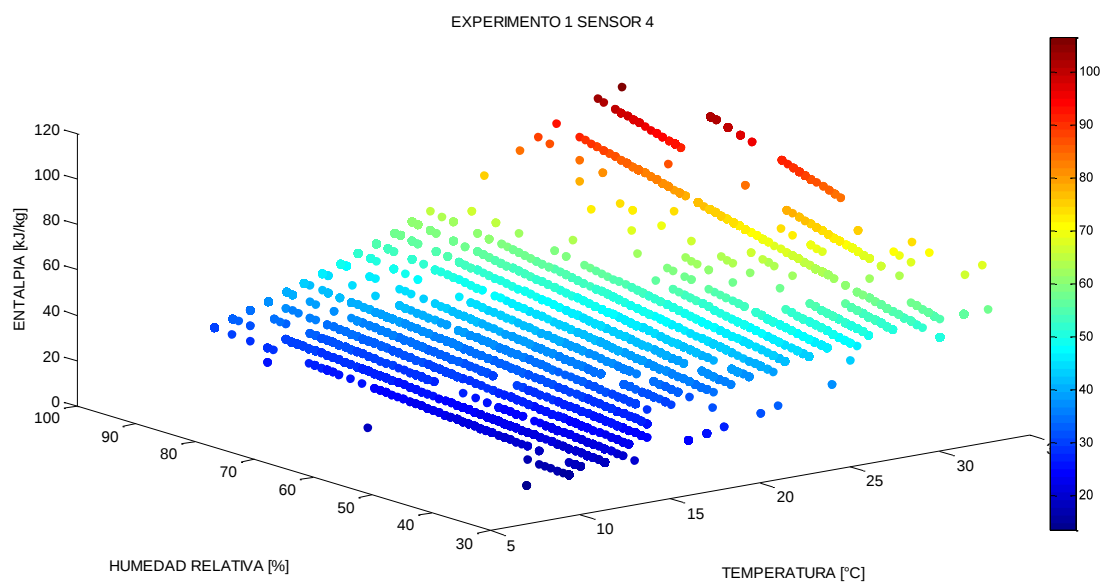


Figura 44. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 4.

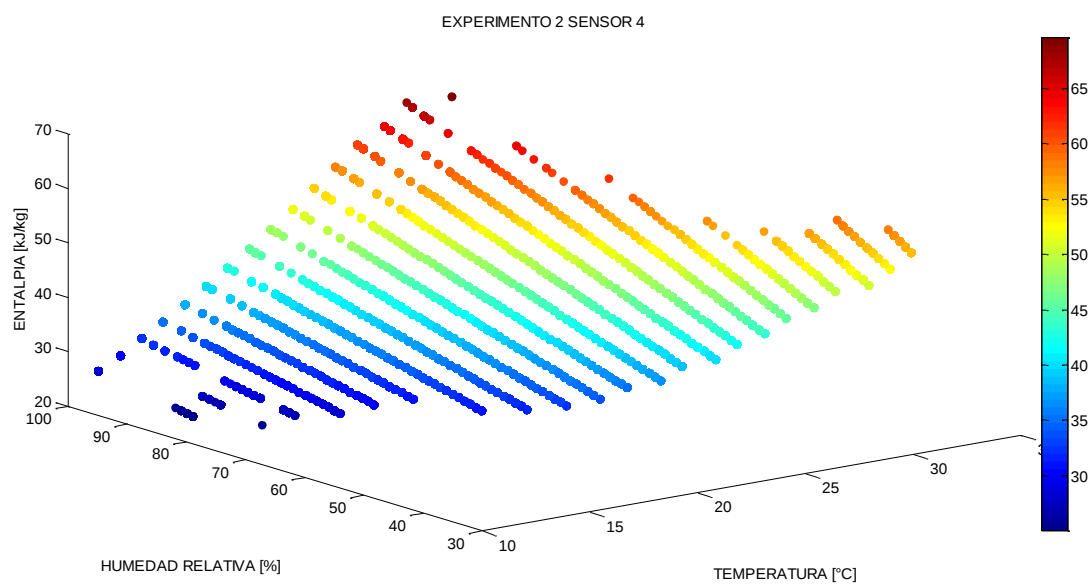


Figura 45. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 4.

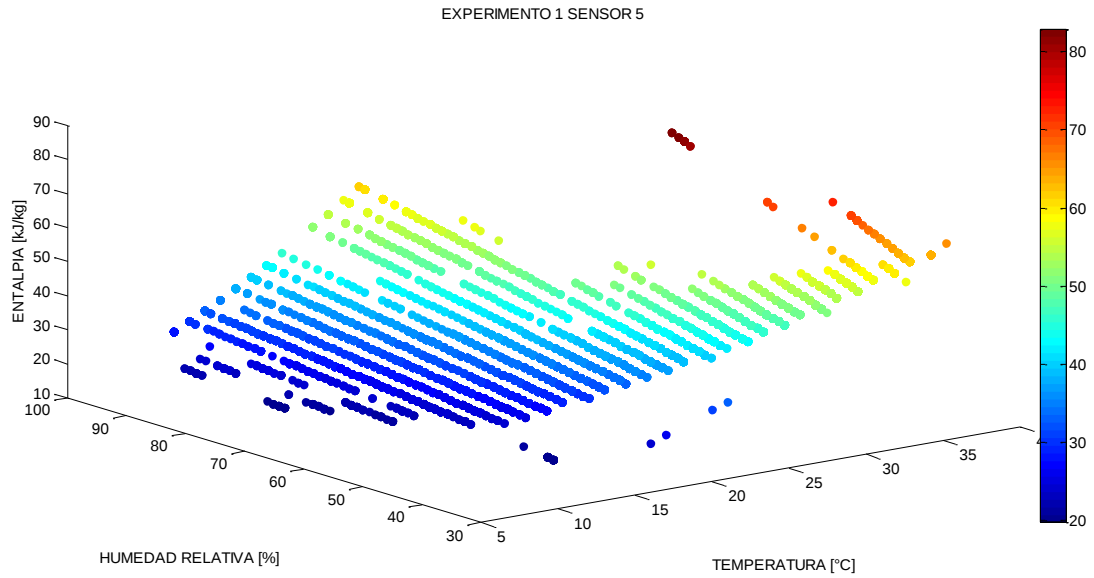


Figura 46. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 1 sensor 5.

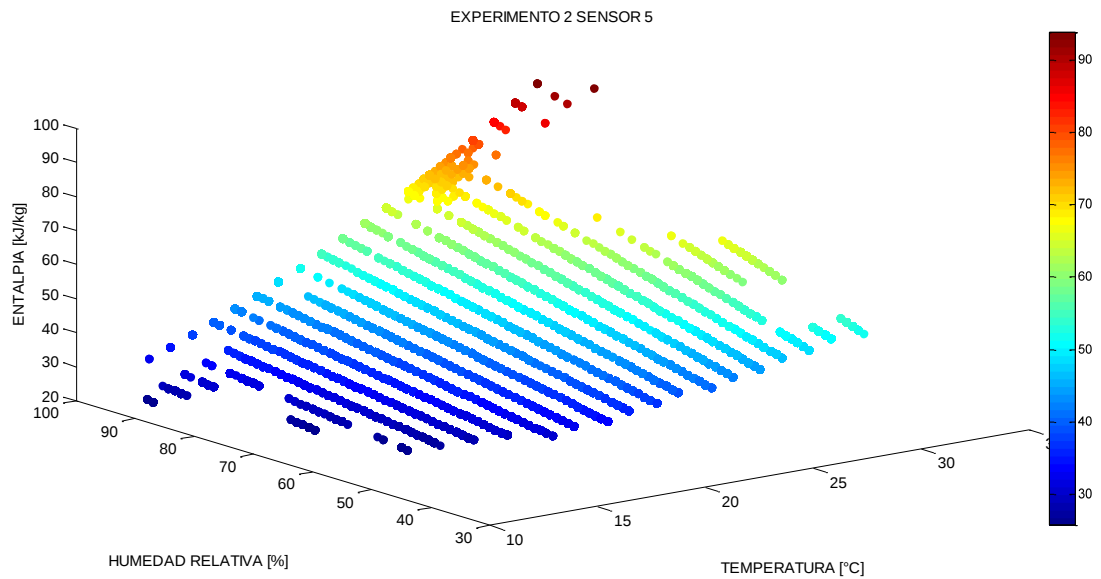


Figura 47. Comportamiento diario de temperatura, humedad relativa y entalpia del experimento 2 sensor 5.

De la Figura 42 a la Figura 47 se puede apreciar que la entalpia aumenta cuando aumenta la temperatura y humedad relativa, aunque la variable que tiene más peso en los resultados de entalpia es la humedad relativa, es por esto que es la mayor variable a controlar en la producción del hongo seta.

En la producción del hongo seta otra variable que juega un papel importante es la transpiración que se define como la capacidad que tiene el cultivo para absorber la humedad que hay de su entorno. La transpiración se puede apreciar en la frescura de las setas. Se calculó la transpiración para la zona de confort del hongo seta con la ecuación 1. Los resultados se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Transpiración para la zona de confort del hongo seta calculada con la ecuación 1.

Humedad relativa. %	Transpiración de la hoja. mg cm ⁻² h ⁻¹
60	2.87
80	1.10

Estos valores están cerca del rango que se reporta en la literatura que es de 0.14 a 2.5 mg cm⁻² h⁻¹.

Las Figuras 48 y 49 muestran el comportamiento de la transpiración estimada con los datos de los sensores en cada experimento. Los datos usados van desde el primer hasta el último día de la cosecha.

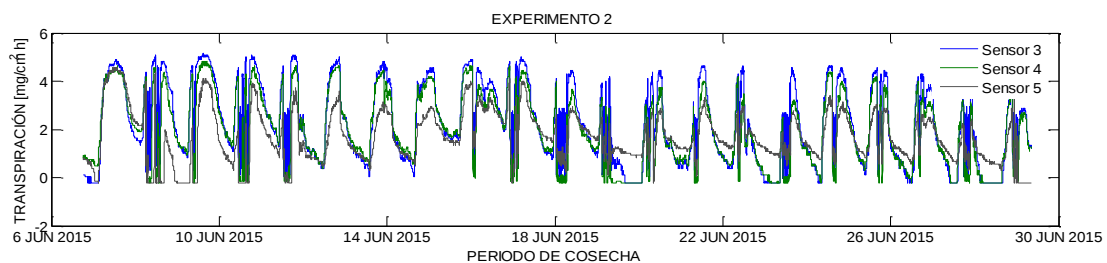


Figura 48. Comportamiento de la transpiración durante la cosecha del hongo seta en el experimento 1.

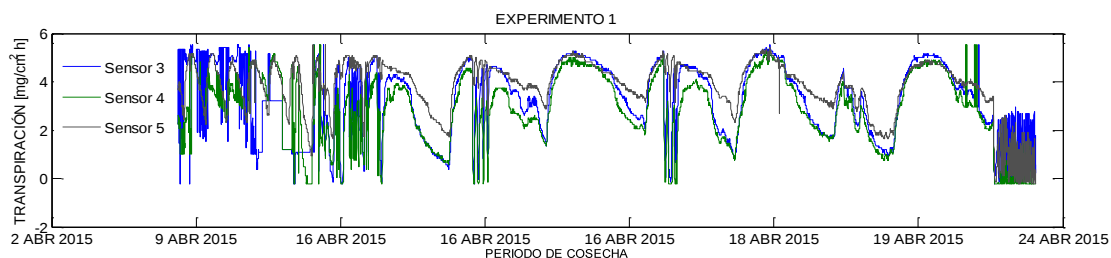


Figura 49. Comportamiento de la transpiración durante la cosecha del hongo seta en el experimento 2.

En las Figuras 48 y 49 se puede ver que la transpiración se comporta de manera igual en los tres sensores y los dos experimentos. Se buscó encontrar un patrón entre transpiración y producción, no se encontró debido a que hubo poca cosecha y fueron amplios los días entre cosecha y cosecha. El Cuadro 10 muestra la transpiración estimada para los sensores tres, cuatro y cinco en los experimentos uno y dos.

Cuadro 10. Transpiración del hongo cerca de cada sensor para los dos experimentos.

		Mínimo	Máximo	Media
		[mg cm ⁻² h ⁻¹]		
Experimento 1	Sensor 3	0	5.522	3.348
	Sensor 4	0	5.522	2.858
	Sensor 5	0	5.522	3.849
Experimento 2	Sensor 3	0	5.168	2.203
	Sensor 4	0	4.814	1.926
	Sensor 5	0	4.549	1.661

La transpiración calculada del Cuadro 10 para los dos experimentos oscila entre 0 y $5.52 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ teniendo como valor medio $2.697 \text{ mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, los valores altos indica que se pierde humedad y es necesario elevarla para que el hongo seta se encuentre en su zona de confort.

Otro aspecto importante en esta investigación son las redes neuronales, los Cuadros 11 y 12 presentan los resultados numéricos de la red neuronal estática, basándose en tres criterios de capa oculta mencionados en la metodología.

Cuadro 11. Resultados estadísticos en entrenamiento validación y prueba de la red neuronal estática para la variable temperatura.

Criterio	Temperatura									
	ECM					EAM				
	E	S3	S4	S5	S3	S4	S5	S3	S4	S5
Capa oculta										
2n+1=15	2	16.80	19.23	15.04	4.10	4.39	3.88	3.38	3.58	3.28
n=m=7	2	17.48	19.56	14.99	4.18	4.42	3.87	3.48	3.70	3.21
√nm=4	2	18.70	19.92	15.58	4.32	4.46	3.95	3.67	3.73	3.29

E= Experimento, S3=sensor 3, S4=sensor 4, S5=sensor 5, ECM= Error cuadrático medio, RECM= Raíz del error cuadrático medio, EAM= error absoluto medio.

De acuerdo al Cuadro 11, la red neuronal que tuvo el menor error cuadrado medio fue la que se corrió con los datos del sensor cinco para los tres criterios de capa oculta mencionados en la metodología, seguido de la red que se corrió para el sensor tres.

Cuadro 12. Resultados estadísticos en entrenamiento validación y prueba de la red neuronal estática para la variable humedad relativa.

Criterio capa oculta	Humedad relativa									
	ECM				RECM			EAM		
	E	S3	S4	S5	S3	S4	S5	S3	S4	S5
2n+1=15	2	261.92	238.77	220.95	16.18	15.45	14.86	13.83	12.80	12.71
n=m=7	2	274.43	242.33	209.31	16.57	15.57	14.47	14.24	12.98	12.38
$\sqrt{nm}=4$	2	285.51	245.12	223.62	16.90	15.66	14.95	14.66	13.06	12.88

E= Experimento, S3=sensor 3, S4=sensor 4, S5=sensor 5, ECM= Error cuadrático medio, RECM= Raíz del error cuadrático medio, EAM= error absoluto medio.

De acuerdo al Cuadro 12, la red neuronal que tuvo el menor error cuadrado medio fue la que se corrió con los datos del sensor cinco para los tres criterios de capa oculta mencionados en la metodología.

Con el fin de mejorar los resultados de la red estática se implementó una red dinámica para los mismos sensores y experimentos, los resultados se muestran en los Cuadros 13 y 14.

Cuadro 13. Resultados estadísticos de temperatura de la red neuronal dinámica.

Temperatura									
ECM			RECM			EAM			
E	S3	S4	S5	S3	S4	S5	S3	S4	S5
2	17.0975	18.45	13.89	4.13	4.30	3.73	3.40	3.48	3.00

E= Experimento, S3=sensor 3, S4=sensor 4, S5=sensor 5, ECM= Error cuadrático medio, RECM= Raíz del error cuadrático medio, EAM= error absoluto medio.

De acuerdo al Cuadro 13, la red neuronal que tiene el menor error cuadrado medio para el segundo experimento fue la red que se corrió para el sensor cinco, seguido del sensor tres y por último el sensor cuatro.

Cuadro 14. Resultados estadísticos de humedad relativa de la red neuronal dinámica.

Humedad relativa									
ECM			RECM			EAM			
E	S3	S4	S5	S3	S4	S5	S3	S4	S5
2	267.03	227.67	194.29	16.34	15.09	13.94	14.05	12.48	11.66

E= Experimento, S3=sensor 3, S4=sensor 4, S5=sensor 5, ECM= Error cuadrático medio, RECM= Raíz del error cuadrático medio, EAM= error absoluto medio.

De acuerdo al Cuadro 14, la red neuronal que tiene el menor error cuadrado medio para el segundo experimento fue la red que se corrió para el sensor cinco, seguido del sensor cuatro y por último el sensor tres.

La Figura 50 y 51 muestra la predicción de la red neuronal dinámica para temperatura y humedad relativa del experimento dos sensor tres respectivamente. Los resultados obtenidos no fueron los esperados.

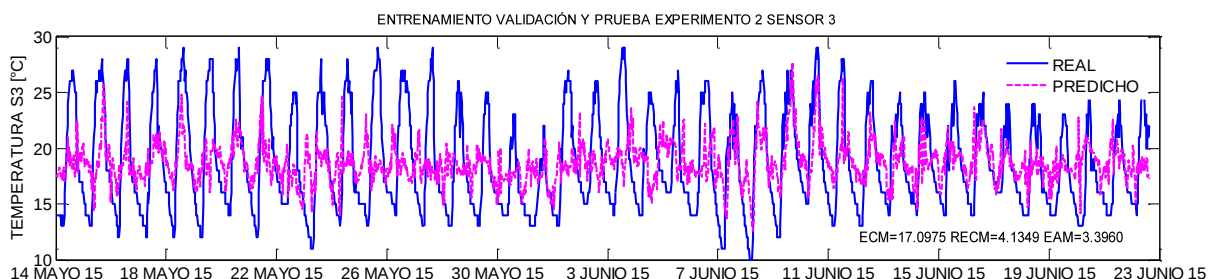


Figura 50. Valores reales y predichos de temperatura con el modelo dinámico experimento 2 sensor 3.

En la Figura 50 los valores predichos se acercan a los reales en dos periodos del experimento: del 14 al 22 de mayo y del 3 al 23 de junio. Del 23 de mayo al 2 de junio se sigue la tendencia del promedio de los valores reales de temperatura que es de 17.67 °C.

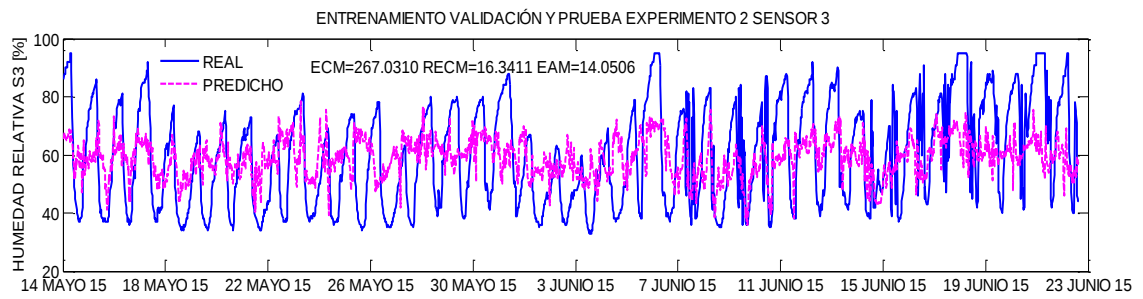


Figura 51. Valores reales y predichos de humedad relativa con el modelo dinámico experimento 2 sensor 3.

En la Figura 51 los valores de humedad relativa predichos no se acercan a los reales en todo el periodo del experimento.

6. CONCLUSIONES.

El hongo seta requiere de condiciones de higiene y limpieza en cada uno de sus procesos, esto con el fin de evitar plagas y enfermedades. En los dos experimentos realizados en este trabajo no se detectaron plagas, ni enfermedades.

El hongo seta es una de las especies más robustas y comerciales donde se puede empezar a buscar y entender los detalles de los procesos de producción, así como su control. En general, los hongos son sensibles a cambios en temperatura y humedad, los rangos óptimos están entre 18 y 28 °C, y entre 60 y 80 % respectivamente. Dichas condiciones ambientales, en forma natural solo eran posibles en lugares intertropicales o en temporadas muy cortas dentro de las áreas boscosas o de mucha vegetación y presencia de gran cantidad de material leñoso y humus. Los retos técnicos implican reproducir las condiciones ambientales para generar un proceso productivo competitivo en cualquier lugar y época del año. Esto requiere un espacio semi-cerrado que permita manipular y controlar ciertas variables donde la temperatura y humedad son las más visibles en sus efectos sobre la producción.

Se instaló y controló un sistema nebulizador automático acorde a las necesidades de humedad relativa del hongo seta. Los problemas que se tuvieron en la instalación de los sensores y el sistema de riego fueron los siguientes: el voltaje no fue suficiente para alimentar a los sensores, reloj, pantalla y tarjeta donde se

grabaron los datos. La solución de este problema fue poner una fuente de voltaje alterna de 5 V para que alimentara estos dispositivos.

El sistema de riego no funcionaba con la señal de los sensores. El problema fue que el relevador de estado sólido que se colocó en un principio no funcionaba de manera correcta, se instaló el relevador del estado sólido porque se pensó que sería más fácil el encendido y apagado del sistema nebulizador. La solución fue hacer el circuito de transistor y relevador compacto de 1 tiro. Este circuito se conectó al sistema de adquisición de datos y funcionó de forma correcta para el encendido y apagado de la bomba.

El sistema nebulizador automático controlado por sensores de humedad relativa y temperatura tiene como ventajas que el propietario no tendrá que estar pendiente de la humedad que hay en el interior de la nave de producción, ya que los sensores se encargarán de ejecutar esta tarea y regar el tiempo necesario para obtener las condiciones óptimas de humedad relativa del hongo seta; así como tener un sistema nebulizador automático controlado por sensores de humedad relativa y temperatura de bajo costo, con la capacidad de monitorear en tiempo real el comportamiento de temperatura y humedad relativa; las principales desventajas son el alto consumo de agua y corriente eléctrica. El consumo de agua es de \$60 MN por periodo de siembra, el consumo de energía eléctrica es de \$300 MN por cada periodo de siembra.

El experimento es pionero en la instalación del sistema de nebulización y control de la humedad relativa del hongo seta. Estudios posteriores pueden llevarse a

cabo incluyendo los efectos de otras variables físicas y el análisis de CO₂ del ambiente, así como de los componentes químicos de los hongos.

Se estudió la distribución de temperatura y humedad relativa en la unidad de producción del hongo seta. No fue posible controlar las condiciones ambientales con un sistema nebulizador, debido a que el espacio en el que se llevó a cabo el experimento estaba muy pequeño y se notaron fugas de aire por las ventanas, además que la pared ubicada hacia el este, sólo estaba tapada con láminas de cartón y esto influyó en que hubo más superficie expuesta a la radiación solar. El sensor que estuvo en las condiciones más adecuadas a las óptimas fue el sensor 3, que estaba colocado al centro de la unidad de producción.

Debido a los altos niveles de humedad relativa que se requieren en la producción de hongo seta, es necesario cuidar más el calor latente ya que el producto puede sufrir daños, lo que se traduce en pérdida al momento de comercializar el cultivo.

El análisis económico puede ser motivo de un estudio exhaustivo donde se compare no solo el balance de entrada en insumos y la salida en kilos o pesos, sino también el papel de la calidad y las variaciones estacionales del mercado.

En este estudio, se implementó un espacio de 9 m³. Los costos fijos fueron de \$9890.50 MN; para producir de manera continua 1 paca de 20 kg de cebada seca con micelio cada una. Cada paca representa \$810.00 MN en costos variables. El kilogramo del hongo seta en el mercado local es de \$40.00 MN, para tener una ganancia del 50 % de los costos variables, es necesario elevar el rendimiento a

30 kg de hongo seta. A partir de la cosecha número 12 se habrán saldado los gastos fijos.

En la implementación de las redes neuronales se tuvo el problema que los datos tomados de la estación meteorológica estaban en intervalos de treinta minutos, los datos obtenidos de los sensores a un minuto por lo tanto se empataron los últimos con los primeros. En la búsqueda por encontrar el mejor modelo que se adaptará a lo requerido se usó la red neuronal estática y dinámica. Con la red estática se probaron tres condiciones de capa oculta hasta que se dieron los mejores resultados; entre ellas hubo diferencias, por esto se implementó la red neuronal dinámica. Al realizar pruebas y revisar estadísticos se concluyó que el mejor modelo fue la red neuronal dinámica, sin embargo no se pudo implementar la red para propósitos de predecir las lecturas de los sensores.

7. LITERATURA CITADA.

Ángeles M.V., 2002. Fundamentos de hidráulica para diseño y revisión de riego presurizado (Fundamentos técnicos). Universidad Autónoma Chapingo. México. 228p.

Bartzanas T., Kittas C., Sapounas A., 2007. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. Biosystems Engineering. pp: 97, 229-239.

Bastida T. A., Villaseñor M.L., 2006. Manejo y operación de invernaderos agrícolas. Universidad Autónoma Chapingo. México. 238p.

Ben-Yehoshua S., 1987. Transpiration, water stress, and gas exchange. In J. Weichmann. Postharvest physiology of vegetables. New York: Marcel Dekker Inc.

Both A.J., 2005. Greenhouse temperature management. Bioresource Engineering Department of Plant Biology and Pathology. Rutgers University, New Brunswick N.J. USA.

Castro Ch. N.S., López J. C.A., Moreno M.E.J., 2012. Desarrollo de prototipo para micocultura controlando las variables para las condiciones ideales de desarrollo del hongo seta. Tesis, IPN. México.

Chang, S.T., Hayes W. A., 1978. The Biology and Cultivation of Edible Mushrooms. Academic Press Inc., New York, USA. 819p.

Colasanti R.L., 1991. Discussions of the possible use of neural network algorithms in ecological modeling. Binary 3, 13–15.

Colina E., Rivas F., 1998. Introducción a la inteligencia artificial. Universidad de los Andes. Venezuela.

Collantes D. J. V., 2001. Predicción con redes neuronales comparación con las metodologías de Box y Jenkins. Tesis. Venezuela.

Fernández M. F., 2004. Guía práctica de producción de setas (Pleourotus Spp). Fungitec asesorías. Guadalajara Jalisco. México. pp: 11-12

Flores M. A., Contreras T. M., 2012. Manual del cultivo seta (Pleorotus ostreatus) de forma artesanal. UNAM. México. 37p.

Gaitán R., Salmones D.; Pérez R., Mata G., 2006. Manual práctico del cultivo de setas (aislamiento, siembra y producción). Instituto de ecología. Xalapa Veracruz, México. 56p.

García O. S.X., Garduño R. E. A., 2013. Cultivo domestico de setas (Pleurotus sp) como alternativa alimentaria. Primer congreso estudiantil de investigación del sistema incorporado. UNAM.

Gutiérrez M. A., Aguilar J. C.E., Galdámez G. J., Mendoza P.S., Martínez A. F.B., 2007. Impacto socioeconómico de los sistemas de policultivos maíz, frijol, calabaza en la Frailesca, Chiapas. México. Almería: Seminario de

cooperación y desarrollo en espacios rurales iberoamericanos sostenibles e indicadores.

Guzmán G., Mata G., Salmones D., 1993. El cultivo de los hongos comestibles. IPN. México. 258p.

Hagan M., Demuth H., Beale M., 1996. Neural network design. PWS Publishing Company. USA.

Haykin S., 1994. Neural networks: a comprehensive foundation. Macmillan College Publishing Company. USA.

López J.R., Hernández A.J.M., Pérez R. A., González H. J.F., 1997. Riego localizado. Segunda edición. Editorial Mundi-Prensa. España.

López V. L. A., 2008. Diseño de un sistema de control de temperatura on/off para aplicaciones en invernadero utilizando energía solar y gas natural. Tesis. Pontificia Universidad católica del Perú.

Lugo E. O., Quevedo N. A., Bauer M. J.R., del Valle P. D.H., Palacios V.E., Águila M. M., 2011. Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. México. Vol. 2. pp: 659-672.

Mahajan P.V., Oliveira F.A.R., Macedo I., 2007. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms. Elsevier.

Matich D.J., 2001. Redes neuronales: Conceptos y aplicaciones. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario, Argentina.

Noble A., Hema P.S., Saritha E.K., Shinoj S., 2000. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. India: Elsevier. Agricultural Water Management. Vol. 45. pp: 145-147.

Oei P., 2005. Small-scale mushroom cultivation. Agromisa Foundation and CTA. Wageningen, The Netherlands. pp: 14-15.

Olden J.D., Jackson D.A., 2002. Illuminating the black box: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial networks. Ecological Modelling. ELSEVIER.

Ortíz R. F., 2008. Análisis y diseño de redes neuronales CMAC para la identificación y control de sistemas no lineales. México.

Rinker D. L., 1986. Commercial Mushroom Production. Ontario Ministry of Agriculture and Food. Parliament Building, Toronto, Ontario Canada. pp: 32.

Sánchez V.J.E., Royse D. J., 2001. La biología y el cultivo de Pleurotus spp. El Colegio de la frontera sur. Chiapas México.

Schmidth U., 2005. Microclimatecontrol in greenhouses base don phytomonitoring data and Mollier phase diagram. Humboldt University, Institute for Horticultural Sciences, Berlin.

Vaisala, 2013. Las mediciones climáticas en los invernaderos garantizan un óptimo crecimiento en las plantas.

Vedder P. J. C., 1978. Modern Mushroom Growing. Grower Books. 50 Doughty Street, London, England WCIN 2LP. Pp: 420.

Wuest P.J., 1982. How to manage the watering of a mushroom crop. Penn State Handbook for Commercial Mushroom Growers. The Pennsylvania State University, University Park.

Páginas de internet consultadas.

a. <https://avdiaz.files.wordpress.com/2009/01/i-unidad3.pdf>, consultado:19/6/15

b. <https://es.wikipedia.org/wiki/Entalp%C3%ADa>, consultado:19/6/15

c. https://es.wikipedia.org/wiki/Red_neuronal_a

d. <https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>, consultado 9/7/15

e. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>, consultado 9/7/15

f. <https://panamahitek.com/dht11-sensor-de-humedadtemperatura-para-arduino>, consultado 9/7/15

g. https://es.wikipedia.org/wiki/Reloj_en_tiempo_real, consultado 9/7/15

8. ANEXOS

8.1 Programación de arduino para la recolección de datos y sistema de encendido y apagado del sistema nebulizador.

```
#include <Wire.h> //cargamos la librería Wire
#include "RTCLib.h" //cargamos la librería RTC reloj
RTC_DS1307 RTC; // modelo del reloj usado
#include <LiquidCrystal.h> //cargamos la librería LCD
LiquidCrystal lcd(22, 23, 24, 25, 26, 27); //Pines de arduino donde se
conectarán la lcd

#include <SPI.h> //cargamos la librería SPI (Serial Peripheral Interface) es
básicamente un bus de comunicación a nivel de circuitos integrados. La
transmisión de datos se realiza en serie, es decir un bit después de otro.

#include <SD.h> //cargamos librería de la memoria SD

File SENSORES; // nombre del archivo donde se escribirán los datos

File dataFile; // el archivo sensores es un archivo de datos

#include <dht.h> //cargamos la librería DHT sensores

//Selección de pines en arduino donde se conectan los sensores

#define DHTPIN1 31 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTPIN2 33 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTPIN3 35 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTPIN4 37 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTPIN5 39 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTPIN6 41 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTTYPE DHT11 //Se selecciona el modelo del sensor DHT11; hay
otros sensores DHT

int BOMBA = 48;

float HRPX, HRP, TP;

float h1, h2, h3, h4, h5, h6;

float t1, t2, t3, t4, t5, t6;
```

```
float const LI=60.0;
```

```
float const LS=80.0;
```

```
DHT dht1 (DHTPIN1, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
DHT dht2 (DHTPIN2, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
DHT dht3 (DHTPIN3, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
DHT dht4 (DHTPIN4, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
DHT dht5 (DHTPIN5, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
DHT dht6 (DHTPIN6, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por  
Arduino para comunicarse con el sensor
```

```
void setup(){
```

```
    Serial.begin(9600); //Se inicia la comunicación serial
```

```
    lcd.begin(16,2); //Se inicia la LCD
```

```
    lcd.setCursor(0,0);
```

```
    lcd.setCursor(0,6);
```

```
    lcd.setCursor(0,1);
```

```
    lcd.print("HRP");
```

```
    lcd.setCursor(9,1);
```

```
    lcd.print("TP");
```

```
    Serial.print("Inicializando SD card...");
```

```
    pinMode(53, OUTPUT);
```

```
    if (!SD.begin(53)) {
```

```
        Serial.println("Inicializacion fallida!");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```

Serial.println("Inicializacion hecha.");

Serial.println("Hecho!");

// dataFile=SD.open("SENSORES.txt", FILE_WRITE);// se abre el archivo
nombrado SENSORES

Wire.begin();

RTC.begin();

dataFile.print("Fecha");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR1");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR2");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR3");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR4");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR5");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HR6");
dataFile.print(",");
dataFile.print("HRP");
dataFile.print(",");
dataFile.print("  ,  ");
dataFile.print("T1");
dataFile.print(",");
dataFile.print("T2");
dataFile.print(",");
dataFile.print("T3");
dataFile.print(",");

```

```

dataFile.print("T4");
dataFile.print(",");
dataFile.print("T5");
dataFile.print(",");
dataFile.print("T6");
dataFile.print(",");
dataFile.print("TP");
dataFile.println(",");
dataFile.close();

  dht1.begin(); //Se inicia el sensor
  dht2.begin(); //Se inicia el sensor
  dht3.begin(); //Se inicia el sensor
  dht4.begin(); //Se inicia el sensor
  dht5.begin(); //Se inicia el sensor
  dht6.begin(); //Se inicia el sensor
pinMode(BOMBA,OUTPUT);
pinMode(HRPX, INPUT);
}

void loop(){
  dataFile=SD.open("SENSORES.txt", FILE_WRITE);
  h1=dht1.readHumidity(); //Se lee la humedad
  t1=dht1.readTemperature(); //Se lee la temperatura
  h2=dht2.readHumidity(); //Se lee la humedad
  t2=dht2.readTemperature();//Se lee la temperatura
  h3=dht3.readHumidity(); //Se lee la humedad
  t3=dht3.readTemperature();//Se lee la temperatura
  h4=dht4.readHumidity(); //Se lee la humedad
  t4=dht4.readTemperature();//Se lee la temperatura

```

```

h5=dht5.readHumidity(); //Se lee la humedad
t5=dht5.readTemperature();//Se lee la temperatura
h6=dht6.readHumidity(); //Se lee la humedad
t6=dht6.readTemperature();//Se lee la temperatura
HRP=((h1+h2+h3+h4+h5+h6)/6.0); //Se lee la humedad relativa promedio
TP=((t1+t2+t3+t4+t5+t6)/6.0); //Se lee la temperatura promedio
//HRPX=((h3+h4)/2);
HRPX=(h3/1.0);
// float HRPX=((h1+h2)/2);
if(HRPX <= LI)
{
    digitalWrite(BOMBA,HIGH);
    delay(500);
    //delay (300000);
}
if(HRPX >= LS)
{
    digitalWrite(BOMBA,LOW);
    h1=dht1.readHumidity(); //Se lee la humedad
    t1=dht1.readTemperature(); //Se lee la temperatura
    h2=dht2.readHumidity(); //Se lee la humedad
    t2=dht2.readTemperature();//Se lee la temperatura
    h3=dht3.readHumidity(); //Se lee la humedad
    t3=dht3.readTemperature();//Se lee la temperatura
    h4=dht4.readHumidity(); //Se lee la humedad
    t4=dht4.readTemperature();//Se lee la temperatura
    h5=dht5.readHumidity(); //Se lee la humedad
    t5=dht5.readTemperature();//Se lee la temperatura

```

```

h6=dht6.readHumidity(); //Se lee la humedad
t6=dht6.readTemperature();//Se lee la temperatura
HRP=((h1+h2+h3+h4+h5+h6)/6.0); //Se lee la humedad relativa promedio
TP=((t1+t2+t3+t4+t5+t6)/6.0); //Se lee la temperatura promedio
HRPX=((h1+h2+h3+h4+h5+h6)/6.0);
}

DateTime now= RTC.now();
dataFile.print(now.year(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.month(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.day(), DEC);
dataFile.print(' ');
dataFile.print(now.hour(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.minute(), DEC);
dataFile.print(':');
dataFile.print(now.second(), DEC);
dataFile.print(" ");
//dataFile.print();          //sin ln
//DateTime now = RTC.now(); // Obtiene la fecha y hora del RTC
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(now.hour(), DEC);

```

```

Serial.print(':');
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.println();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(now.year(), DEC);
lcd.print('/');
lcd.print(now.month(), DEC);
lcd.print('/');
lcd.print(now.day(), DEC);
lcd.print(' ');
lcd.print(now.hour(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(now.minute(), DEC);
lcd.print(':');
lcd.print(now.second(), DEC);
lcd.println();
//delay(600);
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print(HRP);
//delay(600);
lcd.setCursor(11,1);
lcd.print(TP);
//delay(600);
//Datos impresos de humedad relativa y temperatura en el monitor serial
Serial.print("HR1: ");
Serial.print(h1);

```

```
Serial.print("T1: ");  
Serial.println(t1);  
  
Serial.print("HR2: ");  
Serial.print(h2);  
Serial.print("T2: ");  
Serial.println(t2);  
Serial.print("HR3: ");  
Serial.print(h3);  
Serial.print("T3: ");  
Serial.println(t3);  
Serial.print("HR4: ");  
Serial.print(h4);  
Serial.print("T4: ");  
Serial.println(t4);  
Serial.print("HR5: ");  
Serial.print(h5);  
Serial.print("T5: ");  
Serial.println(t5);  
Serial.print("HR6: ");  
Serial.print(h6);  
Serial.print("T6: ");  
Serial.println(t6);  
Serial.print("HRP: ");  
Serial.print(HRP);  
Serial.print("TP: ");  
Serial.println(TP);
```

//Datos impresos de humedad relativa en archivo SENSORES.TXT

```
dataFile.print(h1);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(" ");
dataFile.print(h2);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(h3);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(h4);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(h5);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(h6);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(HRP);
dataFile.print("  ");
//delay(300000);
//Datos impresos de temperatura en archivo SENSORES.TXT
dataFile.print(t1);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(t2);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(t3);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(t4);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(t5);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(t6);
```

```
dataFile.print(" ");  
dataFile.println(TP);  
dataFile.print(" ");  
//delay(300000);  
dataFile.close();  
delay(60000);  
//delay(300000);//Tiempo entre lecturas de 5 minutos  
}
```