



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

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

**ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus
indica* L.) A VARIACIONES EN AGUA Y FERTILIZACIÓN BAJO
PRODUCCIÓN SEMIFORZADA.**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



DIRECCIÓN GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

P R E S E N T A

MARTÍN AZÚA BARRÓN

CHAPINGO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2014



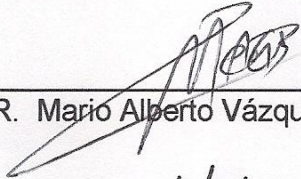
**RESPUESTA DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus indica* L.) A
VARIACIONES EN AGUA Y FERTILIZACIÓN BAJO PRODUCCION
SEMIFORZADA.**

Tesis realizada por Martin Azúa Barrón, bajo la dirección del Dr. Mario Alberto Vázquez Peña. Aprobada y aceptada por el comité asesor indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

COMITÉ ASESOR:

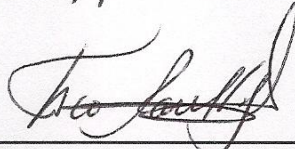
DIRECTOR:


DR. Mario Alberto Vázquez Peña.

ASESOR:


DR. Mauricio Carrillo García

ASESOR:


M. C. Fco. Raúl Hernández Saucedo

Chapingo, México. Diciembre de 2014

DEDICATORIA

A mi familia Oralia, Isaac, Melissa y Keevin que siempre han confiado en mí y han sabido tener la paciencia, sin su apoyo este proyecto no hubiese sido posible. Gracias y una disculpa por todos los momentos que me necesitaron y no estuve allí para ellos.

A mis padres Víctor y Liduvina que me han enseñado la determinación necesaria para llevar a buen puerto los proyectos.

A mis hermanos Francisco, María Guadalupe, Ma. Leticia y Víctor... los momentos de infancia juntos son inolvidables.

A todos los compañeros del posgrado con los que compartí momentos de angustia y alegría en los que aprendíamos un poco más.

A todos los maestros del posgrado que me brindaron una oportunidad, espero no haberlos defraudado.

A todos los que en este momento escapan a mi memoria y que algún momento me dieron una palabra de aliento... gracias.

A nadie culpo por mis fracasos. Porque como lo dijo el poeta, yo soy el arquitecto de mi propio destino.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado en Ingeniería Agrícola Y Uso Integral del Agua por permitirme realizar mis estudios de maestría. Gracias alma mater.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, por todo el apoyo durante la realización de este trabajo, tiempo en el cual brindo toda su disposición, experiencia, tiempo y conocimientos.

Al Dr. Mauricio Carrillo García, por todo el apoyo y disposición para que este trabajo se llevara a cabo.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por ser asesor de este trabajo de tesis de maestría y cuyas aportaciones fueron claves para llevarlo a buen término.

Al MC. Raúl Hernández Saucedo, por todo el apoyo brindado y las aportaciones para enriquecer esta investigación.

A todos los maestros del posgrado de IAUJA, H. Departamento de Irrigación y DIMA, por no escatimar apoyos para la realización de este proyecto.

A Rosy, Mayra, Lety y Jacqueline, por toda la ayuda desde sus trincheras.

Al CONACYT Consejo nacional de ciencia y tecnología por la beca que tuvo a bien asignarme y sin la cual este proyecto no hubiera sido posible.

DATOS BIOGRÁFICOS

Martin Azúa Barrón, nació el 18 de agosto de 1969, en la ciudad de Cerritos, S.L.P. en donde cursó sus estudios de primaria, secundaria y preparatoria en un Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario (CBTA 123).

En el año de 1987 ingresa a la Universidad Autónoma Chapingo donde cursó la carrera de ingeniero agrónomo especialista en irrigación, egresando en el año de 1992. Realizó su trabajo de Tesis titulado “Índices agroclimáticos para la delimitación de las áreas factibles para el desarrollo de varios cultivos en San Luis Potosí” bajo la dirección del entonces MC. Ramón Arteaga Ramírez, logrando dicha titulación en el año 1993.

A partir del año 1993 trabajó para el Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática (INEGI) por un periodo de 5 años.

En el extranjero trabajó para la Tyson Fresh Meats inc antes IBP por un periodo de 9 años y para la ORBIS corporation 3 años.

En Agosto de 2012, ingresa al programa de maestría del posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua que ofrece la Universidad Autónoma Chapingo, en el cual cursa la orientación de uso integral del agua, titulándose en diciembre del 2014.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus indica* L.) A VARIACIONES EN AGUA Y FERTILIZACIÓN BAJO PRODUCCIÓN SEMIFORZADA

ANALYSIS OF PRICKLY PEAR (*Opuntia ficus indica* L.) RESPONSE TO VARIATIONS IN WATER AND FERTILIZATION UNDER SEMIFORCED PRODUCTION

Martin **Azúa Barrón**¹ y Mario Alberto **Vázquez Peña**²

RESUMEN

La escasez de agua es una preocupación constante. En esta investigación se somete al nopal verdura plantado directamente en el suelo y bajo cubierta de plástico en su modalidad de microtúneles a diferentes láminas de riego y dosis de fertilización mediante un diseño estadístico factorial. El consumo de agua del nopal verdura bajo condiciones de microtúneles es aproximadamente un 20% menor

ABSTRACT

The lack of water is a constant concern. In this investigation prickly pear cactus for production of tender cactus pads was planted directly in soil under a plastic cover known as microtunnel and subjected to growth with different irrigation depths and amounts of fertilizer. Data were analyzed under a factorial statistical design. The cactus' water consumption under microtunnel conditions was approximately 20%

que si estuviera a la intemperie; además se aumenta la temperatura media diaria un promedio de 5.5 grados centígrados lo cual permite que la producción de nopalitas tiernos fuera de temporada. De este trabajo se encontró que cultivando nopal verdura en microtúneles y aplicando una lámina de riego equivalente al 25 % de la evaporación del lugar y fertilizando con 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno permite la posibilidad de obtener cosechas de hasta 200 t ha⁻¹ de nopality con un buen manejo y fuera de temporada.

Palabras claves: nopal verdura, láminas de riego, microtúneles, fertilización, humedad del suelo.

1 Tesista

2 Director de Tesis

less than in direct outdoor exposure; also, the average temperature was 5.5 °C higher, inducing the production of tender cactus pads out-of-season. It was found that by cultivating prickly pear in microtunnels with an irrigation depth equal to 25% of onsite evaporation and fertilization with 200 kg ha⁻¹ of nitrogen, along with good management, it is possible to obtain yields of up to 200 t ha⁻¹ of tender cactus pads out of season.

Palabras claves: tender cactus, irrigation depths, microtunnels, fertilization, soil moisture.

1 Thesis Author

2 Thesis Director

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS.....	5
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	5
2.2	OBJETIVOS PARTICULARES	5
2.3	HIPÓTESIS.....	5
3	REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1	IMPORTANCIA DEL NOPAL.....	14
3.1.1	Alimentaria	14
3.1.2	Forrajera.....	15
3.1.3	Industrial.....	16
3.1.4	Medio ambiente.....	18
3.1.5	Medicinal	18
3.2	FERTILIZACIÓN DEL NOPAL VERDURA	19
3.3	RIEGO EN NOPAL VERDURA.....	20
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	22
3.4.1	Bloques Completos al Azar en Parcela Divididas	23

3.5	SEPARACIÓN DE MEDIAS.....	27
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
4.1	EL MICROCONTROLADOR.....	29
4.2	SENSORES UTILIZADOS.....	31
4.2.1	Módulo hmz433a1.....	31
4.2.2	Sensor HL-69	34
4.2.3	Sistema de adquisición de datos.....	35
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	38
4.3.1	Localización Geográfica	38
4.3.2	Clima	40
4.3.3	Suelo	41
4.3.4	Material vegetal	42
4.4	MANEJO DE LA PLANTACIÓN.....	45
4.5	DEFINICIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE HUMEDAD Y FERTILIZACIÓN.....	47
4.5.1	Tratamientos de humedad	47
4.5.2	Tratamientos para la fertilización.....	50
4.6	CONSTRUCCIÓN DE MICROTÚNELES	51
4.7	PLANTACIÓN DEL NOPAL VERDURA	53

4.8	INSTALACIÓN DE LOS SENSORES Y EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA	55
4.9	MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN EL INTERIOR DE LOS TÚNELES Y A LA INTEMPERIE	58
4.10	MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	60
4.11	DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS GRANDES Y CHICAS.....	64
4.12	LOS CORTES.....	65
4.13	VARIABLES RESPUESTA	67
4.13.1	Rendimiento	67
4.14	CONSUMO DE AGUA.....	67
4.15	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	68
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
6	CONCLUSIONES	81
	LITERATURA CITADA	84
	ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 La placa arduino Uno utilizada en este proyecto.	30
Figura 2 Dispositivo que contiene los sensores de humedad relativa y temperatura HMZ433A1.	32
Figura 3 Sensor para medir la humedad del suelo HL-69.....	35
Figura 4 Diagrama de conexión de los componentes del SAD diseñado.	36
Figura 5 Sistema de adquisición de datos construido en la UACH (IAUIA- Departamento de irrigación) 2014.....	37
Figura 6 Imagen satelital publicada por Google Earth del área en la cual se estableció el experimento.	39
Figura 7 Plantación de nopal verdura de donde se obtuvo la planta madre en la localidad de Otumba, Edo. de México.	44
Figura 8 Calidad de la planta de nopal verdura de donde se obtuvo la planta madre en la localidad de Otumba, Edo. De México.	44
Figura 9 Marco de plantación utilizado en el diseño experimental de nopal verdura.....	45
Figura 10 Estructura de los microtúneles orientados norte-sur.....	52
Figura 11 Trabajos necesarios para la construcción de los microtúneles a) trabajos para anclaje y b) instalación de los arcos.....	52
Figura 12 Vista de los microtúneles terminados.	53

Figura 13 Brotación de las primeras raíces de la planta madre a los 14 días de trasplantadas.	54
Figura 14 Cladodios de la planta madres que no tuvieron éxito al ser plantados.	54
Figura 15 Instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa HMZ433A1 dentro de un microtúnel.....	55
Figura 16 Datos obtenidos con los siete sensores en operación y datos medidos en la estación meteorológica Chapingo (a) y gráfica generada (b) para un día en particular (25 de febrero de 2014).....	57
Figura 17 Tanque tipo A en el interior de un invernadero cercano a los microtúneles para medir la evaporación diaria.....	58
Figura 18 La evaporación medida al interior del invernadero y a la intemperie.	59
Figura 19 Calibración de los sensores de humedad del suelo (HL-69).....	61
Figura 20 Curva de calibración obtenida de manera experimental para el sensor de humedad del suelo HL-69.....	62
Figura 21 Distribución del agua en el suelo en porcentaje, datos promedio de la profundidad de los primeros 12 cm del suelo.	63
Figura 22 Distribución de los tratamientos de humedad y las dosis de fertilización nitrogenada al interior de los microtúneles.....	65
Figura 23 Material obtenido en uno de los cortes realizados (14 de junio 2014).	66

Figura 24 Diagrama de cajas del análisis del primer corte realizado el 14 de junio 2014	70
Figura 25 Gráfica de la producción media por bloque en función del % de humedad aplicado.....	73
Figura 26 Gráfica de la producción media por bloque en función de la cantidad de nitrógeno aplicada.....	74
Figura 27 Gráfica de la precipitación total en mm registrada de enero a septiembre por la estación meteorológica Chapingo en el año 2014.....	75
Figura 28 Diagrama de cajas del segundo corte analizado.	76
Figura 29 Gráfica de la producción media por bloque en función del % de humedad aplicado.....	79
Figura 30 Gráfica de la producción media por bloque en función de la cantidad de nitrógeno aplicada.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cantidad de agua requerida por diferentes cultivos forrajeros para producir un kilogramo de materia seca de forraje (INIFAP, 2008).	22
Tabla 2 Análisis de la varianza para el diseño bloques completos al azar en parcelas divididas (Montgomery, 2013 y Martínez, 2005).....	26
Tabla 3 Datos para calibración del sensor para H.R. del HMZ433A1 emitida por el fabricante.	32
Tabla 4 Datos para calibración del sensor para temperatura del HMZ433A1 proporcionada por el fabricante.	33
Tabla 5 láminas de agua evaporadas a la intemperie y las láminas repuesta al cultivo del nopal en el periodo indicado.	69
Tabla 6 Análisis de varianza a los 15 días de aplicados los tratamientos.....	70
Tabla 7 Separación de medias por el método de Tukey para el factor humedad.	71
Tabla 8 Separación de medias de la fuente de variación debido a la fertilización.	72
Tabla 9 Análisis de varianza a los brotes producidos del 17 de agosto al 21 de septiembre.	76
Tabla 10 Separación de medias por el método de Tukey para los niveles de humedad.....	77

Tabla 11 Separación de medias por el método de Tukey para los niveles del factor fertilización nitrogenada.	78
---	----

ANEXOS.

Anexo 1 Gráficas de la temperatura media diaria y la humedad relativa media diaria observadas en los meses en los que se llevó a cabo el experimento.....	94
Anexo 2 Gráficas de la evaporación al interior del invernadero y a la intemperie para los meses en los que se observó el experimento.	100
Anexo 3 Mapas de la humedad del suelo en los microtúneles y su evolución durante 15 días en los cuales se le aplico riego cada tercer día.....	102

1 INTRODUCCIÓN

Las cactáceas consideradas autóctonas del continente americano se encuentran distribuidas en las zonas áridas donde caracterizan los paisajes y es en México por sus particulares condiciones de latitud, topografía y climas en donde posiblemente se alberga la mayor cantidad de especies (Bravo, 1978). Se denomina nopal a los géneros *Opuntia* y *Nopalea* de la familia de las cactáceas. En México se encuentran más de 100 especies de género *Opuntia* y es en las zonas semiáridas donde se encuentra la variación más amplia, por lo que algunos botánicos la consideran como el centro de origen de los nopales (CONAZA, 1994). El cultivo del nopal se ha diseminado por el mundo y se está cultivando en 25 países para aprovechar su fruta (tuna), nopalitas tiernas o nopal maduro y es México el único país con producción comercial de nopalitas con una superficie de 12041 ha y rendimientos promedio que varían de 9.03 a 99.93 t ha⁻¹ y en promedio 64.33 t ha⁻¹ (Blanco *et al*, 2011).

En nuestro país hay una tradición en el cultivo y utilización del nopal. Su forma de aprovechamiento ha evolucionado a través del tiempo, desde nopaleras silvestres, la domesticación de huertos familiares, manejo de plantaciones familiares y en los años 70 la producción intensiva en microtúnel, técnica iniciada en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (Flores, 2001).

En México las plantaciones comerciales de nopalito cubren una superficie de 10,500 ha con producción de 577 075 t por año, distribuidas principalmente en los estados del centro del país, la superficie sembrada en las principales entidades son: Distrito Federal (D.F.) (5440 ha), Morelos (1000 ha), Jalisco (1000 ha), Puebla (600 ha). La principal limitante para la producción de nopalito, es la saturación del mercado la mayor parte del año a excepción de los meses finales de otoño e invierno cuando los precios son altos (Flores, 2001).

El mercado internacional más importante, igual que para el resto de las frutas y hortaliza mexicanas es el de Estados Unidos de América, sin embargo los volúmenes de exportación de nopalito son bajos, en 1995 se exportaron 5000 t de las que 1500 eran en fresco y 3500 t procesado aunque estos números tienen tendencia a la alza (Flores *et al*, 1995).

La importancia del nopal para las zonas áridas y semiáridas de México, es que muchas veces es el único cultivo que se puede establecer debido a las condiciones de escasez de agua que prevalecen, y este cultivo puede dar una cierta seguridad alimentaria a los mexicanos que habitan estas regiones de nuestro país y que abarcan 48.29 % del territorio (Flores, 2002). En algunas regiones del país la importancia gastronómica es tal que se hace mención a más de 240 guisos diferentes que pueden ser preparados usando como ingrediente a los nopalitos. Es importante resaltar que con respecto a su característica de tolerancia a condiciones adversas, se refiere principalmente a que la planta logra sobrevivir a ellas, aunque no desarrolla su máximo potencial productivo.

Candelario et al (2014) ha propuesto la técnica de hidroponía para el cultivo del nopal, indicando que ésta es quizás la última frontera en la producción de la cactácea. No descartando que en el futuro puedan surgir nuevas técnicas de cultivo, que sean más revolucionarias que la hidroponía y se lleguen a aplicar en el cultivo del nopal.

Actualmente la mayoría de los países del mundo tienen baja disponibilidad de agua y la tercera parte de ellos ya sufren algún tipo de escasez. Los recursos hídricos de un país se miden con base a la disponibilidad de agua en m^3 por habitante por año y en este contexto México es un país que sufre de disponibilidad baja de agua, la cual es de menos de 5000 m^3 por habitante por año, hace 50 años se disponía del doble del agua actual por lo que en las últimas décadas la situación es francamente alarmante. No obstante esta disponibilidad de agua en México se tiene el problema de la distribución, por ejemplo mientras que en el sureste se tiene una gran disponibilidad de agua en el norte hay una gran escasez (Consejo consultivo del agua A.C., 2013).

El crecimiento poblacional y económico ha ejercido una presión mayor sobre los recursos hídricos de México y la escasez de agua ha generado conflictos que en ocasiones se han tornado violentos pues la competencia por el agua es a muchos niveles: entre los usuarios de una misma comunidad, entre comunidades, municipios, estados e incluso en el ámbito de las fronteras entre los países (Becerra et al, 2006).

La rentabilidad del nopal verdura es un aspecto que también ha sido analizado y se ha encontrado que la producción de nopal en invernadero es viable en el área de Texcoco, Estado de México y en el estudio que se llevó a cabo (Orsohe *et al*, 2012) se obtuvo una relación beneficio costo de 1.15 y una tasa interna de retorno de 20.6 por encima de la tasa de actualización por lo que se concluyó que es viable la producción de nopal verdura en invernadero.

El agua es uno de los recursos más preciados y en función de esto es obligatorio buscar y aplicar técnicas que permitan hacer un uso más eficiente del recurso, evitando el desperdicio, puesto que el agua es un recurso que aunque es considerado renovable está sometido a muchas presiones por lo que se busca contribuir en la investigación de técnicas que ayuden a hacer un uso más eficiente de los recursos en la producción de nopal verdura, y en forma específica se busca encontrar una lámina de riego y una dosis de fertilización que puedan ser aplicadas y que ofrezcan ventajas en la producción de nopal verdura bajo condiciones de producción semiforzada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el rendimiento del nopal verdura en función de la humedad y la fertilización bajo condición semiforzada.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Encontrar una lámina de riego apropiada que permita la producción de nopal verdura en la región Chapingo.

Definir una dosis de fertilización nitrogenada para la producción de nopal verdura aplicable a la región Chapingo.

2.3 HIPÓTESIS

Los insumos agua y fertilización nitrogenada son variables relevantes en la producción de nopal verdura y obedecen a la ley de rendimientos decrecientes.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

El desconocimiento del nopal en cuanto a color, sabor, palatabilidad, valor nutritivo, etc. Así como las mejores variedades para determinado propósito y la forma de establecer el cultivo del nopal y sus cuidados, han sido los factores que desde el principio limitaron el uso, producción y comercialización del nopal en la región (Flores, 1994).

Aun cuando en los tiempos prehispánicos se apreciaba y aceptaba el nopal por parte de la población mexicana como alimento y también para usos diversos como la de untar el jugo extraído de las pencas a las ruedas de los carros para impedir que se quemaran por la fricción y el uso excesivo; así mismo los franciscanos lo cultivaron y encontraron que además de sus frutos les era de utilidad el mucilago para ligar los adobes que requerían para construir sus misiones; hoy en día el nopalito se destina principalmente para el consumo humano, tanto en fresco, en ensaladas, acompañando diferentes platillos, o bien en conservas (CONAZA, 1994).

Actualmente diferentes investigadores han realizado estudios enfocados a determinar los requerimientos hídricos del nopal:

López (2003), en un estudio sobre la fecha de riego y estimuladores de la brotación en nopal tunero, en Jalapa, Zacatecas, encontró una relación directa

entre la fecha de riego y la brotación, ya que riegos en invierno (2/enero, 2/febrero) promovieron una mayor cantidad de brotes.

El riego aplicado 1/diciembre promueve un menor número de brotes, sin embargo, presenta un adelanto en la ocurrencia de la brotación, por lo que el autor concluye que podría repercutir en la cosecha y resulta atractivo desde el punto de vista comercial, por el precio que puede alcanzar la tuna en periodos de mayor demanda que son los meses de marzo a junio.

Robles (1999) evaluó cultivares de nopalito, bajo condiciones de microtúnel en Ojocaliente, Zacatecas (1998-1999). Este trabajo se realizó bajo condiciones de riego en 1998, se utilizaron diez cultivares de nopal verdulero y se utilizó el diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Se realizaron observaciones a las siguientes variables: número de nopalitos, así como el largo, ancho, grosor, peso y velocidad de crecimiento. Concluyeron con solo resultados preliminares que bajo condiciones de microtúnel se pueden obtener altos rendimientos de nopalito por unidad de superficie. Y que debidos a las bajas temperaturas que se presentan para producir nopalito fuera de época es necesario cubrir la plantación o utilizar algún tipo de estructura que mitigue o elimine los daños al cultivo por heladas.

Flores (1994), concluyó que el nopal *opuntia* spp en la región árida lagunera, debido a su ubicación geográfica –en los límites del desierto chihuahuense- con una precipitación anual inferior a los 300 mm anuales, es necesario practicar agricultura de riego para los cultivos tradicionales, puesto que la agricultura de

temporal no es viable. Propone el cultivo del nopal (*Opuntia* spp), para verdura o forraje (brote o penca) o fruta (tuna), como una opción en el uso de los terrenos de temporal, puesto que el nopal con esta precipitación es capaz de producir un estimado de 28 t de peso fresco; cifra que puede aumentar al aplicar riego de auxilio.

Zegbe y Menas (2004), retrasaron la cosecha en nopal tunero cv. Cristalina, la proliferación de los cultivares de burrona y cristalina concentra la cosecha de tuna en los meses de agosto y septiembre, lo que incide en la saturación de los mercados y una consecuente baja en el precio de venta del producto, siendo el caso que en ocasiones no cubre ni el costo de la cosecha. Como solución propusieron retrasar la fecha de la cosecha fuera de la temporada normal y de esa manera sostener o incrementar el precio de venta. Concluyen que es posible retrasar la época de cosecha en el cultivar hasta por 45 días con ventajas comparativas en tamaño y firmeza. Sin embargo, el rendimiento por planta se reduce significativamente. Recomiendan hacer más investigación que incluya análisis de la carga genética de éstos, las condiciones de clima, el riego y la aplicación de fertilizantes son factores agronómicos que deben ser evaluados en su conjunto.

Orona *et al.* (2003), evaluaron la producción de nopal verdura (*Opuntia* spp) bajo riego por goteo en la comarca lagunera para lo cual realizaron un experimento en el que se consideraron cuatro variedades de nopal las cuales fueron sometidas a riegos equivalentes a 30, 45, 60 % de la evaporación diaria y recomiendan regar para su zona de estudio al 30 % de la evaporación diaria,

puesto que de acuerdo a su experimento fue la que dio mejores resultados en cuanto a productividad del agua. Plantean que ante la escasez de agua en la comarca lagunera situada en la zona árida del norte de México, se requiere encontrar cultivos que combinados con tecnologías de ahorro de agua, hagan un uso eficiente de este recurso. El objetivo del trabajo fue mostrar la productividad del agua en nopal hortícola (*opuntia spp.*) con riego por goteo bajo las modalidades de riego superficial y sub superficial, no se encontró evidencia de si es mejor una modalidad o la otra. Los tres niveles de riego estudiados fueron con relación a la evaporación diaria de 30, 45, 60%. Encontraron que a menor aplicación de agua se advierte una mayor productividad promedio en todas las variedades, lo que confirma el escaso requerimiento de agua del nopal para sus funciones metabólicas. Con aplicaciones excesivas de agua, la planta fue afectada por hongos y bacterias que originaron pudriciones, clorosis y, en general, deficiente desarrollo vegetativo. En términos de agua utilizada por hectárea, considerando la superficie realmente ocupada por el cultivo, equivalente a 7200 m², para el riego que considera un 30 % de evaporación correspondería 5340 m³/ ha, volumen inferior al requerido en cultivos regionales tradicionales como el maíz, frijol, hortalizas y forrajes, que oscila entre 5500 m³/ha para frijol y 18000 m³/ha para alfalfa. Con esta comparación se comprueba que el nopal puede ser una alternativa para cultivarse en las zonas áridas.

El nopal tiene una ventaja fisiológica por encima de los demás cultivos que es: su alta eficiencia del uso del agua, que alcanza valores de 1 kilogramo de

materia seca por cada 162 kilogramos de agua (Han y Felker, citados por Candelario *et al.*, 2014). Con todo y eso la plantación de opuntia para la producción de forraje no es común, debido a que las poblaciones silvestres de nopal actúan como una reserva natural de forraje para el ganado. Sin embargo, estos sitios se encuentran en riesgo debido al uso excesivo y daño por heladas severas que se han presentado en la última década. Por lo que indica que las plantaciones de opuntia podrían reducir esta presión sobre las poblaciones silvestres. Aunque el agua se considera un recurso renovable, en algunas áreas el crecimiento poblacional y la consecuente urbanización están cambiando este concepto. Por lo que las iniciativas para mejorar el uso del agua son cada vez más importantes. Señalando que la hidroponía es quizás la última frontera en la producción del nopal forrajero (Candelario *et al.*, 2014).

La fertilización también es un factor que ha sido de interés en el estudio del nopal y se han realizado experimentos en los cuales se han probado dosis de fertilización tanto orgánica como inorgánica:

Salazar *et al.* (2003), en una publicación que trata de la agricultura orgánica mencionan, que aunque el nopal se le considera una planta rústica, responde muy bien a la aplicación de abonos ya sea orgánicos o químicos. Así mismo indica que los requerimientos nutricionales del nopal no son diferentes a los de otros cultivos. Es una práctica común para los agricultores de Nuevo León aplicar los nutrientes al nopal a través del riego y al aplicar los fertilizantes disueltos en agua se han obtenido buenos resultados.

Zúñiga *et al.* (2009), realizaron un estudio aplicando el diseño de bloques al azar, en el cual probaron dos dosis de fertilizante orgánico el cual consistió de 100 y 200 t ha y una dosis de fertilizante inorgánico aplicados en tres profundidades (0-18, 18-36 y 36-54 cm) y con cuatro repeticiones, con objeto de determinar el efecto que tienen las aplicaciones de estiércol bovino y fertilizantes minerales en diferentes profundidades con respecto al crecimiento radical encontraron diferencias significativas en los diferentes tratamientos, es decir que la fertilización con fertilizante de origen animal o mineral tiene un impacto significativo en el desarrollo del sistema radicular. También encontraron que el rendimiento de nopalitos, la producción de materia seca y el número de brotes fueron mayores en las plantas sometidas al tratamiento de 100 t ha⁻¹ de estiércol aplicado en el estrato superior (0 a 18 cm)

Orúe *et al.* (2008), realizaron un trabajo en Nicaragua para encontrar la respuesta del nopal a diferentes dosis (enmiendas) de fertilizante, dada la importancia que tiene el nopal en las zonas áridas en donde es fuente de alimentación para humanos y animales, surge la necesidad de estudiar más los aspectos de la producción como son la aplicación de fertilizantes; encontró que el nopal responde a la fertilización y que con una dosis de 12-15-10 para su área de estudio se promueve la mejor brotación de nopalitos. También emite una recomendación para el uso de composta a razón de 2 kg por planta.

Ríos y Quintana (2004), mencionan que con respecto a la fertilización el INIFAP sugiere para terrenos con tepetate y poco profundos 5 t ha⁻¹ de estiércol vacuno, que equivale a 8 kg por cepa. Una vez iniciadas las lluvias se sugiere

agregar 100 gramos de sulfato de amonio por cepa. Al segundo año 100 g del mismo sulfato y al iniciar la etapa de fructificación en adelante, cada tercer año, incorporar cantidades semejantes de estiércol con una adición de 50 g de superfosfato de calcio simple a cada cepa, se indica que se pueden usar otros fertilizantes pero se debe aplicar las cantidades equivalentes. Para el caso del estado de México, la fertilización se realiza durante los primeros tres años con 8-10 kg de abono de origen animal por planta y se agregan de 100 a 150 g de fertilizante inorgánico por planta, utilizando la mayoría de las veces urea. En el caso de utilizar fertilización orgánica se utilizan grandes cantidades de este del orden de 100 a 200 t ha⁻¹ cada tres años y se le adiciona de 100 a 200 kg de Nitrógeno y de 80 a 100 kg de Fósforo por hectárea.

Para la región norte de México en particular para el área de Caborca, Sonora; es aconsejable aplicar de 50 a 100 t de estiércol por ha en la producción de nopal, el estiércol se debe de incorporar en la capa del suelo a una profundidad de 0 a 25 cm, lo anterior basándose en las evidencias (Robles, 2008).

Valdez *et al.* (2003), realizaron un experimento para probar dosis de fertilización (N-P₂O₅-K₂O: 0-0-0, 40-20-20, 80-40-40 y 120-80-80) y tres variedades de nopal (Copena V1, Villanueva y jalpa) el diseño que utilizaron fue el de tres bloques al azar y un arreglo en parcelas subdivididas, de sus resultados se puede concluir que la dosis 60-80-80 fue la más adecuada, aunque con una desviación estándar que indica igualdad estadística con la 40-40-40.

La modelación de la producción del nopal verdura es un tema que ya se ha iniciado, se obtuvo un modelo para describir la respiración en función de la humedad relativa y la temperatura con un R^2 de 0.95 (Guevara *et al.*, 2006). Otro experimento para relacionar la producción de materia seca y las unidades calor acumuladas, el modelo que mejor ajustó es un sigmoide con tres parámetros y un coeficiente R^2 de 0.9724, se reporta que por cada unidad calor acumulada el peso fresco se incrementa en 0.122 kg (Almaguer *et al.*, 2007).

Se han realizado estudios en los cuales se ha encontrado vinculación entre la extracción de nutrientes del suelo por el nopal dependiendo de la humedad del suelo y temperatura del ambiente; lo cual es un indicador de las necesidades de nutrientes por parte del cultivo y a mayor demanda de nutrientes mayor producción de biomasa (Orona *et al.*, 2004).

Las proporciones entre los diferentes nutrientes en el cladodio de la planta adulta es muy importante en la producción de la misma, algunas proporciones promueven la producción y otras la inhiben. Entre los minerales que promueven la brotación de nopalitos están N, Mg, Ca y K en las cuales el rendimiento aumenta conforme aumentan sus concentraciones en los cladodios de un año de edad; las proporciones que benefician la producción de biomasa están K/P, Ca/P y Mg/P y las que la inhiben P/N, Mg/N y Ca/N lo anterior da una idea de lo complejo que es la nutrición de la planta del nopal, (Blanco *et al.*, 2011)

3.1 IMPORTANCIA DEL NOPAL

El nopal es una planta que se aprovecha como: alimento, forraje, fertilizante orgánico, como mejorador de los ecosistemas al mitigar la erosión de los suelos, como insumo en la industria de alimentos y en la industria en general (se le ha encontrado aplicaciones como aditivo de las pinturas).

3.1.1 Alimentaria

Se han documentado más de 240 platillos en los cuales uno de los ingredientes principales son los nopalitas y en este sentido se han empezado a implementar microempresas como el que analizó Ramírez (2012) en la producción de la tortilla de nopal desde el punto de vista de una microempresa en el cual detalla el proceso de producción. Puente (2008) hizo una clasificación de las maneras básicas de utilizar el nopal en la alimentación clasificándolos en: entradas, sopas y cremas, guisos, bebidas, postres y otros, así también menciona algunas técnicas inéditas de utilizar el nopal (galletas de nopal, tortillas de nopal y dulces de nopal).

3.1.2 Forrajera

Hoy en día el nopal tiene una importancia forrajera considerable. Y en este tenor se han venido desarrollando esfuerzos para conocer más las propiedades del nopal como forraje “Por su capacidad de adaptación, su resistencia a largos periodos de sequía, y su rápido crecimiento el nopal constituye una alternativa para diversas regiones del mundo, especialmente para aquellas en donde la disponibilidad de agua hace difícil obtener alimento para el ganado.” La aportación de nutrientes depende de la edad de los cladodios lo cual debe tomarse en cuenta cuando se alimente al ganado (Reveles *et al*, 2009). En cuanto a las variedades preferidas para la producción de forraje son las que no tienen espinas por su fácil manejo y proceso, con estas especies se evita el chamuscar los cladodios antes de alimentar el ganado ejemplo de estas son COPENA F1, Liso Forrajero, Pabellón. Sin embargo, los costos de establecimiento y producción de estas variedades no siempre son económicos por lo que hay que continuar aprovechando racionalmente el nopal nativo y contar con opciones diferentes para el productor agropecuario (Gutiérrez *et al.*, 2007).

Brom (1970), hizo un análisis del nopal como forraje, considerándolo como una fuente inagotable. Una hectárea sembrada de nopal forrajero de variedad sin espinas, a una distancia de 2.5 metros de distancia entre mata y mata y con igual distancia entre surcos, sustentaría una población de 1600 sujetos. Si cada uno de estos sujetos tuviera como término medio 30 pencas cada uno con un

peso aproximado de 1 kg por penca, resultaría una producción de 48 t ha⁻¹. Si el término medio de volumen para alimentar un animal es de 50 kg diarios, suponiendo que solo se alimenta de nopal, entonces las 48 t serían suficientes para mantener 8 animales al año.

3.1.3 Industrial

La actividad industrial también ha empezado a investigar las posibles aplicaciones que le puede dar al nopal o a sus subproductos, se ha documentado que el mucilago del nopal ha sido utilizado en la industria como aditivo natural en alimentos, puesto que en la alimentación humana todo lo que sea natural es especialmente cotizado pues se relaciona a que es seguro y sano aunque esto no es necesariamente cierto (Sáenz y Berger, 2006).

Mestrallet *et al.* (2009), condujeron un estudio para ver los efectos del nopal y algarrobo (mezquite) en recubrimientos de alimentos, en particular, determinaron los efectos en la estabilidad química y sensorial de los cacahuates dorados, este trabajo indicó que el uso de estas cubiertas mejoraba la estabilidad del producto haciéndolo más resistente a la oxidación de grasas y a la generación de olores indeseables. Este trabajo es un estudio en una de las múltiples aplicaciones que se le puede dar al nopal, en este caso combinado con el algarrobo o mezquite (*prosopis spp*)

Ramírez (2012), presentó un documento en el que analizó la producción de la tortilla de nopal desde el punto de vista de una microempresa (MYPE). Detalla el proceso de elaboración de las tortillas de nopal.

Dentro de las propiedades químicas de los nopales se han hecho estudios como los realizados por Corrales *et al.* (2004) en relación a los cambios de acidez y la capacidad amortiguadora del pH en nopales, la acidez en nopales es una de las variables más importantes para los consumidores que prefieren sabores agradables y entre las diferentes variedades que analizaron encontraron diferencias significativas, por lo que es una de las variables a considerar cuando se va a establecer una plantación comercial de nopales. Indicaron que cada variedad tiene un PH característico y este a su vez dependerá de la hora del día en que se realice la cosecha.

En la búsqueda de productos orgánicos que sean fermentables para la producción de etanol, se ha puesto atención al nopal por las características de fácil y rápida digestión y puede ser un ingrediente importante en la producción de este alcohol; muchos productores han sugerido que se realicen proyectos que investiguen la viabilidad del uso del nopal en este tipo de procesos (Gutiérrez *et al.*, 2007). Por otra parte el mucilago compuesto de carbohidratos que contiene mucha fibra dietética y por eso es de gran interés como aditivo no solo para la industria alimenticia sino para usos industriales en general (Sáenz *et al.*, 2003).

3.1.4 Medio ambiente

Los ecosistemas naturales son reguladores del ciclo hidrológico, captura y almacenamiento de agua, fijación de carbono y liberación de oxígeno, generación y conservación de suelos entre otros aspectos. También son una fuente de diversos materiales para el ser humano tales como alimentos, medicinas y maderas, el ecosistemas más grande en México es el que corresponde a las zonas áridas con aproximadamente 58.5 millones de ha (Vázquez, 2008). En el control de la erosión que provoca el empobrecimiento de los suelos y en ocasiones la pérdida total de estos, es importante la reforestación y allí es donde el nopal contribuye a mitigar los efectos dañinos de la erosión. En México se ha plantado nopal para evitar la erosión de los terrenos agrícolas mayormente utilizándolo en los bordes de las curvas a nivel y así conservar los suelos agrícolas (Flores *et al.*, 2007).

3.1.5 Medicinal

En el campo de la medicina el nopal se considera una planta con propiedades antidiabéticas y antihipertensivas, por lo que para tratar problemas relacionados con estas enfermedades el nopal es una de las plantas más recomendadas (Esquivel *et al.*, 2012). La enzima nopalinaza contenida en la planta del nopal,

de la que se han realizado estudios altamente especializados en México, tiene la facultad de controlar y cargar de manera eficiente las células beta del páncreas las que controlan muy bien el azúcar sanguíneo (García et al., 2009).

El nopal también es una planta ampliamente recomendada para tratar problemas de obesidad y sobrepeso, por sus propiedades Hipoglucemiante y digestivo (Saucedo y Bañuelos, 2014).

3.2 FERTILIZACIÓN DEL NOPAL VERDURA

Los estudios realizados en cuanto a fertilización y nutrición para el cultivo del nopal verdura son hoy en día muy pocos en comparación con la atención que han recibido los granos y cereales (Orona *et al.*, 2004).

El suelo es el medio natural para el crecimiento de las plantas y la mayoría de las veces no puede aportar los nutrientes que requieren los cultivos y en el caso del nopal no es la excepción, los nutrientes que las plantas toman del suelo son los que limitan el desarrollo de las mismas y es necesario aplicar estos nutrientes por medio de la fertilización, de manera general el incremento de nitrógeno en los cladodios promueve la brotación. Aun cuando hay avances, los requerimientos nutricionales del cultivo del nopal son poco conocidos, así como de los sinergismos y antagonismo entre los nutrimentos (Valdez *et al.*, 2009).

En un trabajo realizado para investigar las interacciones nutrimentales en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo en Zacatecas en las que

se probaron 4 fórmulas de fertilizante (00-00-00, 40-20-20, 80-40-40, 120-80-80) y las variedades “Jalpa” “Villanueva” y “Copena V-1” se muestrearon los cladodios maduros para determinar los componentes y ver su relación con la producción de brotes, encontrando que el rendimiento depende de manera significativa de los nutrimentos N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad; se encontró que la interacción de N y Ca son antagónicas , lo cual quiere decir que cuando uno aumenta el otro disminuye. Las proporciones K/P, Ca/P, Mg/P tienen un efecto positivo sobre el rendimiento y P/N, Mg/N y Ca/N afectan negativamente la producción de biomasa. Los resultados anteriores indican lo complejo que es la nutrición de la planta (Blanco *et al.*, 2011).

3.3 RIEGO EN NOPAL VERDURA

El estudio de la respuesta de los cultivos a los niveles de humedad es un tema que ha ocupado a autores como Noriega (1986) que hizo una recopilación y análisis de metodologías experimentales del estudio de la respuesta de los cultivos a los niveles de humedad del suelo, estudio centrado en cereales, leguminosas y otros cultivos pero no en cactáceas. Un dato interesante que menciona es que un porcentaje de humedad aprovechable en el suelo de 30 % es algo muy conveniente y que en el caso de la soja genera los mejores rendimientos.

Aun cuando el nopal se le ubica como una planta resistente a las carencias de agua, responde bien a la aplicación de riego y fertilización, por su metabolismo puede sobrevivir períodos prolongados con poca agua, pero lo anterior le provoca fuerte deshidratación y una disminución en la producción de brotes, por lo que si se requiere someter al nopal a un sistema de explotación comercial deberá de aplicarse riego de una manera regular y en cantidades adecuadas para maximizar la producción. No se debe olvidar que el agua es el principal vehículo de los nutrientes del suelo para llegar a la planta y para que este proceso se lleve de manera correcta el agua en el suelo no debe estar retenida a mas de 3 atmosferas, pues tensiones mayores significaran problemas para la planta del nopal para extraer el agua y los nutrientes (Vázquez *et al.*, 2008).

El metabolismo CAM típico de algunos géneros y familias de plantas de zonas áridas, es una especialización fisiológica que les permite tener una transpiración nocturna. En la noche fijan el carbono en ácidos orgánicos el cual acumulan en las vacuolas y durante el día aprovechan este carbono para formar carbohidratos. El metabolismo CAM les permite obtener ganancias netas de carbono con una pérdida mínima de agua (Mendoza, 2007).

La bibliografía recomienda aplicar el 30% (para la zona de estudio equivale a 740 mm anuales) de la evaporación diaria a través del riego por goteo al nopal verdura, esto de acuerdo con experimentos que se realizaron para ver la productividad del nopal verdura con riego por goteo subterráneo en la comarca lagunera. Existieron variaciones en la producción debido a la temperatura, en

los meses de mayor producción se alcanzaron rendimientos promedio de 22.2 t ha⁻¹ mes⁻¹ bajo riego o buen temporal, (Flores *et al.*, 2004).

La cantidad de agua requerida por el nopal para producir un kilogramo de materia seca es mucho menor que el cultivo del maíz y el cultivo de alfalfa solo superado por el maguey el cual denota una mayor eficiencia en el uso del agua (Tabla 1).

Tabla 1 Cantidad de agua requerida por diferentes cultivos forrajeros para producir un kilogramo de materia seca de forraje (INIFAP, 2008).

Especie	Cantidad de Agua (kg de agua / kg de M.S.)
Maguey	93
Nopal	267
Maiz	367
Alfalfa	750

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es el arreglo de las unidades experimentales que se utiliza para controlar el error experimental, así como el acomodo de los tratamientos. En la literatura se encuentran documentados una gran cantidad de diseños para controlar el error experimental. Lograr la máxima información,

precisión y exactitud en los resultados, así como el uso eficiente de los recursos existentes, son los principios básicos a considerar cuando se elige un diseño experimental en particular (Kuehl, 2001).

En el estudio de los efectos de dos o más factores, los diseños factoriales son los más adecuados, por diseños factoriales se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, si la diferencia en la respuesta de los niveles de un factor A no es la misma en todos los niveles del factor B se dice que hay interferencia en los factores (Montgomery, 2013).

3.4.1 Bloques Completos al Azar en Parcela Divididas

Es un tipo especial de diseño factorial, aplicado en aquellos casos en el que los diferentes factores englobados requieran de diferentes tamaños de parcela y diferentes grados de precisión en las estimaciones. Este diseño experimental es muy utilizado en la agricultura. El caso que se trata en este experimento se ajusta a este tipo de diseño al requerir parcelas grandes para la aplicación de las láminas de riego y parcelas pequeñas para las dosis de fertilización. Una característica de este tipo de diseños es la existencia de dos términos de error experimental uno para la prueba de hipótesis con el factor de las parcelas grandes y otro apropiado para la prueba de hipótesis de las parcelas pequeñas (Martínez, 2005).

El modelo que se utiliza es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ , media general.

τ_i (efecto de los bloques o replicas)

β_j (efecto debido al tratamiento principal A)

$(\tau\beta)_{ij}$ (efecto debido al error a la parcela grande)

γ_k (efecto debido al factor B o subtratamiento)

$(\tau\gamma)_{ik}$ (efecto debido a la interacción entre subparcelas-bloques)

$(\beta\gamma)_{jk}$ (efecto debido a la interacción AB (tratamientos y subtratamientos))

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ (efecto debido al error en la subparcela)

ε_{ijk} (Error total)

Este tipo de diseño factorial es considerado en esencia una combinación o superposición de dos experimentos. Uno de los factores él A se ubica en la parcela completa o grande, a las parcelas grandes se les aplica aquel factor que es difícil de cambiar o su aplicación a las unidades experimentales se dificulta desde el punto de vista práctico y el otro factor denominado B es aplicado a las unidades experimentales más pequeñas denominadas subparcelas (se aplica el factor cuyos niveles son fáciles o no representa mayor

problema práctico para su aplicación en las unidades experimentales que conforman las subparcelas) (Montgomery, 2013).

La hipótesis estadística nula de interés es la siguiente:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

En esencia indica que todas las medias de los tratamientos ensayados en el experimento son iguales y es la hipótesis que se debe rechazar estadísticamente a un nivel de significancia dado para considerar que hay diferencias significativas y en caso de su rechazo se procede a realizar el análisis de separación de medias.

Para que las conclusiones del análisis de varianza sean validas se debe probar que los datos provengan de poblaciones con distribución normal y que la varianzas sean homogéneas.

Para probar normalidad se utiliza el método gráfico y la prueba de Shapiro-wilk, mientras que para probar el supuesto de varianzas homogéneas se utiliza la prueba de Bartlett y la de Levene modificada. Las pruebas anteriores se encuentran ampliamente documentadas en los libros de diseños experimentales y de estadística. En la tabla 2 se indican los cálculos necesarios para hacer el análisis de varianza del diseño experimental de las parcelas divididas.

Tabla 2 Análisis de la varianza para el diseño bloques completos al azar en parcelas divididas (Montgomery, 2013 y Martínez, 2005).

	Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado Medio (CM)	F _{Calculada}	F _{Teórica}
Parcela completa o grande	Bloques (T) (τ_i)	SC _T	(r-1)=2	SC _T /(r-1)	CM _T /CM _{T-A}	F _{.05,2,8} =4.46
	Factor A (β_j) o tratamiento	SC _A	(a-1)=4	SC _A /(a-1)	CM _A /CM _{T-A}	F _{.05,4,8} =3.84
	Interacción T-A ($\tau\beta$) _{ij} o Error en parcelas grandes	SC _{T-A}	(a-1)(r-1)=8	SC _{T-A} /(a-1)(r-1)		
	Subtotal	SC _{Subtotal}	r a-1=14			
Sub parcela o parcela chica	Factor B (γ_k) o subtratamiento	SC _B	(b-1)=3	SC _B /(b-1)	CM _B /CM _{T-A-B}	F _{.05,3,30} = 2.92
	Interacción (A-B) ($\beta\gamma$) _{jk}	SC _{A-B}	(a-1)(b-1)=12	SC _{A-B} /(a-1)(b-1)	CM _{A-B} /CM _{T-A-B}	F _{.05,12,30} = 2.09
	Interacción (T-A-B) ($\tau\beta\gamma$) _{ijk} O error en subparcelas	SC _{T-A-B}	a(r-1)(b-1)=30	SC _{T-A-B} /a(r-1)(b-1)		
	Error total (ϵ_{ijk})	SC _{totales}	r a b-1=59			

r=número de bloques. a=número de tratamientos. b= número de subtratamientos.

Las valores de las F_{teóricas} con sus grados de libertad y el nivel de significancia son los que corresponden a este trabajo.

El criterio para rechazar la hipótesis nula es cuando la $F_{\text{calculada}} > F_{\text{teórica}}$ si al menos una de las $F_{\text{calculada}}$ es mayor que su respectiva $F_{\text{teórica}}$ entonces al menos una media es estadísticamente diferente y se inicia la tarea de identificar cual media es diferente estadísticamente mediante una técnica de separación de medias.

3.5 SEPARACIÓN DE MEDIAS

La separación de medias se realizó por el método de Tukey ampliamente documentado en los libros de diseños experimentales. Esta prueba permite comparar todos los pares de medias posibles una vez rechazada la hipótesis nula que siempre es el supuesto que todas las medias son iguales.

El procedimiento básicamente consiste en comparar todas las diferencias en valor absoluto entre las medias con una cantidad constante la cual se determina con la siguiente ecuación.

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(a, glError) * S_{\bar{y}_i}$$

Donde:

$q_{\alpha}(a, glError)$ este valor se obtiene de tablas en la cual se entra con el α (nivel de significancia) y a (número de medias a comparar) $glError$ (grados de libertad del error).

Al ser el cuadrado medio del error un estimador de la varianza se sustituye por la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (CME) entre el número de repeticiones (n) a dicho termino también se le conoce como error estándar $S_{\bar{Y}_i}$. El cuadrado medio del error utilizado para separar medias de tratamientos es diferente al utilizado para separar medias de los subtratamientos.

Quedando el criterio de comparación

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(a, glError) * (CME/n)^{1/2}$$

Si el valor absoluto de $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > T_{\alpha}$ entonces permite concluir al nivel de significancia α que μ_i es diferente de μ_j .

Para separar las medias del tratamiento se usa como estimador de la varianza el CM de la interacción bloque-tratamiento, y para la separación de las medias del subtratamiento y las interacciones se utilizaron el CM de la interacción bloque-tratamiento-subtratamiento.

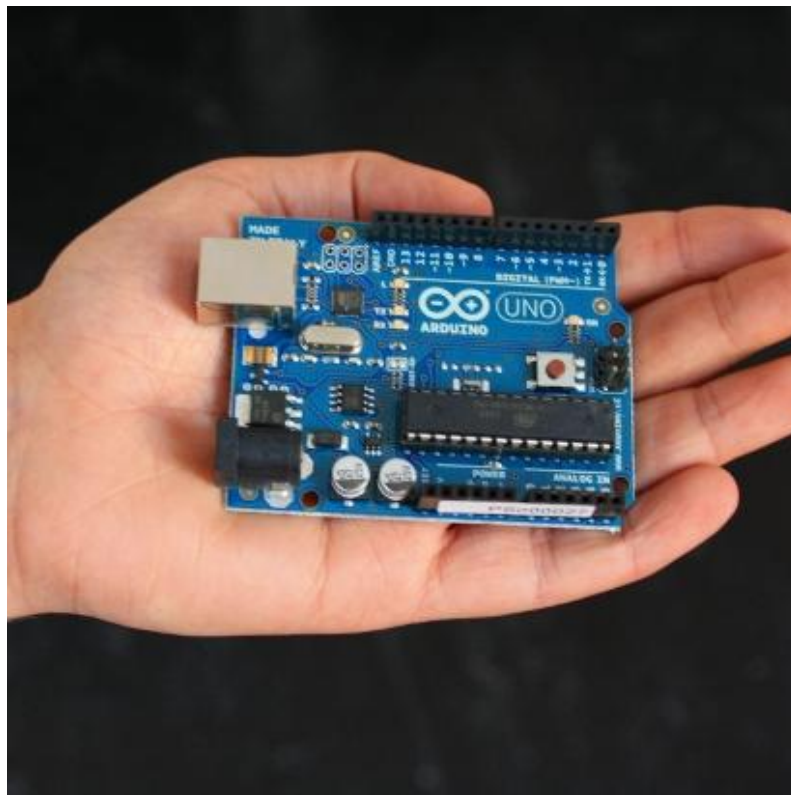
4 MATERIALES Y MÉTODOS

En la agricultura la utilización de la tecnología es una práctica que se generaliza día con día y este trabajo en particular se apoya en el uso de los sensores y los micro controladores para realizar la toma de datos, en el mercado hoy en día se oferta una serie de dispositivos electrónicos y sensores a precios accesibles, tanto en tiendas tradicionales de electrónica como en línea, los cuales pueden ser adaptados, modificados y/o programados para realizar tareas específicas y de interés en la investigación o producción agrícola.

4.1 EL MICROCONTROLADOR

Estos dispositivos electrónicos se han popularizado en los últimos años, debido a que son circuitos electrónicos programables a los que se les grava un programa. Al ser programables se convierten en circuitos a la medida y permiten reducir el tamaño y el costo de los equipos, hoy en día se utilizan en un sinnúmero de aparatos que hacen la vida más cómoda y de mejor calidad. Pero ha sido hasta los últimos años que los precios de estos dispositivos se han reducido y están accesibles a profesionales y aficionados a la electrónica. En resumen el micro controlador es un circuito pequeño que se programa para

controlar otros artefactos o maquinas y sus aplicaciones tienen como única limitante la imaginación (Palacios, 2014). En lo que respecta a la programación del microcontrolador se utilizó el ambiente de desarrollo arduino, que utiliza el microcontrolador atmel 328 p, el ambiente de desarrollo (IDE) es libre y puede ser utilizado sin restricciones, además cuenta con un gran número de librerías que facilitan la tarea de programación (Figura 1)



Fuente: <http://www.Arduino.cc/es/>

Figura 1 La placa arduino Uno utilizada en este proyecto.

4.2 SENSORES UTILIZADOS

Son dispositivos electrónicos que transforman señales no eléctricas medibles (distancia, posición, velocidad, temperatura, humedad relativa etc.) dentro del área de monitoreo, en señales eléctricas, las cuales se pueden almacenar, modificar o transmitir a distancia y son considerados los sentidos de los micro controladores o computadores. Los sensores deben de tener ciertas características generales: pequeño tamaño, bajo consumo de energía y resistente entre otras (Fernández *et al*, 2009).

4.2.1 Módulo hmz433a1

El módulo HMZ433A1 (Figura 2) que se utilizó en este trabajo integra dos sensores, uno para medir la temperatura y otro para medir la humedad relativa (H. R.) del aire. La alimentación de este módulo es con 5 V. de corriente directa y para el caso de la humedad relativa arroja un voltaje de corriente directa lineal de 0 a 90 % (Tabla 3).



Fuente: http://www.agelectronica.com/Virtual_Shop/index.asp?busca=DEV-11114.

Figura 2 Dispositivo que contiene los sensores de humedad relativa y temperatura HMZ433A1.

Tabla 3 Datos para calibración del sensor para H.R. del HMZ433A1 emitida por el fabricante.

Humedad(%H. R)	20	30	40	50	60	70	80	90
Voltaje de salida(V)	.66	.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97

La salida del voltaje para el caso de la temperatura no es de carácter lineal (Tabla 4) y se vuelve necesario encontrar los coeficientes de la ecuación de Steinhart-Hart mediante un sistema de ecuaciones para obtener los coeficientes apropiados.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3$$

T=Temperatura en K

R=Resistencia del termistor en Kohm

A, B y C=Constantes de la curva de aproximación

Se procede a tomar tres pares de valores de la tabla 4, para tener datos conocidos y generar el sistema de ecuaciones necesarias para encontrar las tres incógnitas, normalmente para el cálculo de las constantes, se propone el sistema de ecuaciones simultáneas para las temperaturas 0°C, 25°C y 50°C. Observe que °Kelvin = °C + 273.15.

Sustituyendo datos se tiene:

$$1A + \ln 160.56B + (\ln 160.56)^3 C = \frac{1}{0 + 273}$$

$$1A + \ln 50B + (\ln 50)^3 C = \frac{1}{50 + 273}$$

$$1A + \ln 18.138B + (\ln 18.138)^3 C = \frac{1}{18.138 + 273}$$

Resolviendo el sistema de tres ecuaciones se obtiene los valores siguientes:

$$A = 0.002375311945203.$$

$$B = 0.000246322089759$$

$$C = 0.000000280194860$$

Tabla 4 Datos para calibración del sensor para temperatura del HMZ433A1 proporcionada por el fabricante.

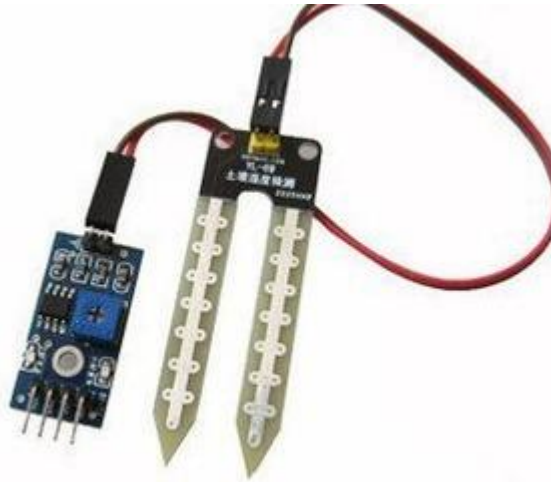
Temperatura(°C)	0	10	20	25	30	40	50	60
Resistencia(KΩ)	160.56	97.714	62.328	50.0	40.356	26.756	18.138	12.554

Al ser compatible con la plataforma arduino y existir librerías ya implementadas por otros programadores se facilita mucho su instrumentación y aplicación.

Para llevar el control del contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje (%) se utilizó el sensor HL-69 compatible con la plataforma arduino UNO.

4.2.2 Sensor HL-69

El sensor mostrado en la figura 3, utiliza la conductividad eléctrica entre dos terminales para determinar ciertos parámetros relacionados con el agua, la salinidad y el contenido de humedad en el suelo. La señal arrojada por el sensor y procesada por el convertidor analógico-digital del arduino a través de un programa genera un valor numérico que varía entre cero y 1023, el cual se correlaciona con el contenido de humedad del suelo en el momento de la medición. El contenido de humedad del suelo se determinó de manera directa por el método gravimétrico que se encuentra ampliamente documentado en los libros de propiedades físicas del suelo.



Fuente: http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-522086025-módulo-sensor-de-humedad-de-tierra-para-arduino-pics-_JM

Figura 3 Sensor para medir la humedad del suelo HL-69

Este sensor se configuró en un arreglo de 5 de estos sensores calibrados para el tipo de suelo en el que se instaló el experimento de manera tal que con pocas mediciones fuese posible cubrir una cuadrícula en las inmediaciones de la planta para mapear el porcentaje de humedad del suelo.

4.2.3 Sistema de adquisición de datos

Para este proyecto de investigación se desarrolló un sistema de adquisición de datos (SAD) basado en la plataforma arduino UNO, el más modesto de los arduinos y con la adaptación de otros accesorios electrónicos como lo son memoria micro SD y el multiplexor CD-4067B le dio una funcionalidad y

características deseables como sistema de adquisición de datos de bajo costo, en la figura 4 se muestra el diagrama desarrollado para la construcción del Sistema de adquisición de datos.

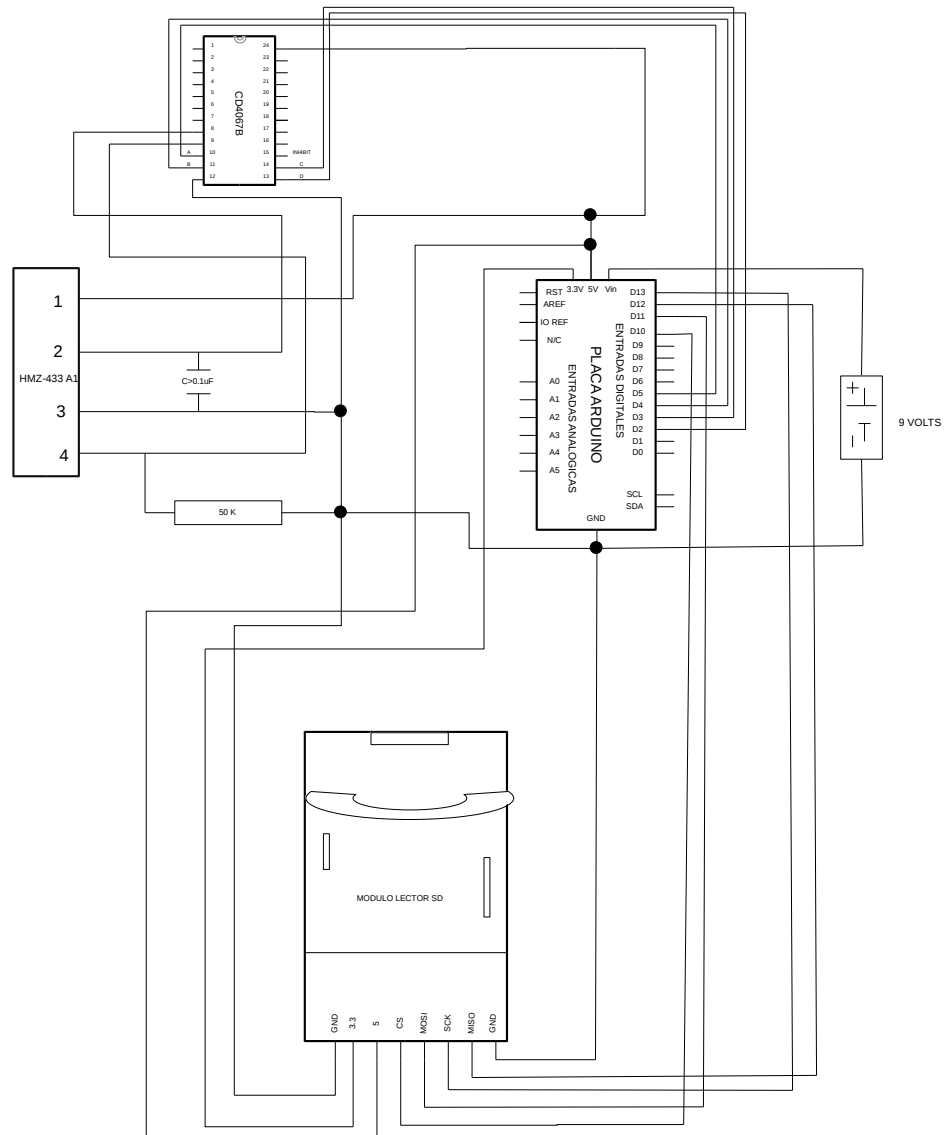


Figura 4 Diagrama de conexión de los componentes del SAD diseñado.

El multiplexor analógico es el dispositivo electrónico que permite seleccionar varias entradas analógicas a un solo canal, para seleccionar la entrada se configura los 4 pines digitales especialmente asignados para esta tarea a través de señales digitales. Este multiplexor permite seleccionar uno de entre 16 canales analógicos, por lo que se pueden conectar 16 sensores y dirigir la señal analógica a un solo pin de entrada analógico del microcontrolador contenido en la tarjeta arduino UNO.

El aspecto físico del sistema de adquisición de datos se aprecia en la figura 5.

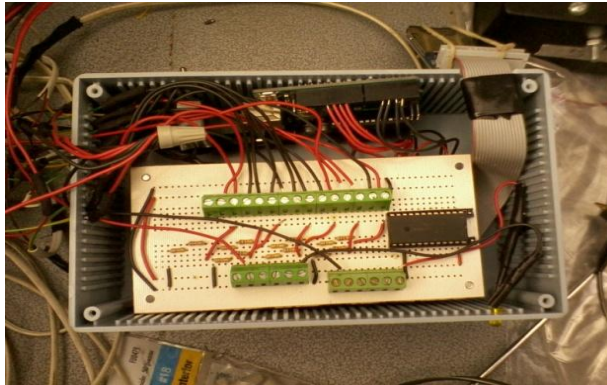


Figura 5 Sistema de adquisición de datos construido en la UACH (IAUIA-Departamento de irrigación) 2014

El sistema de adquisición de datos consta de un programa que le permite utilizar una memoria microSD para el almacenamiento de los datos, los cuales se gravan en formato texto lo que permite que se pueda almacenar una gran cantidad de información por periodos prolongados de tiempo, lo cual dependerá de la frecuencia de medición y de la capacidad de la memoria utilizada, para este SAD se utilizó una memoria de 8 GB. Posteriormente el archivo generado

y almacenado en la memoria puede ser abierto por una hoja de cálculo al conectar la memoria utilizada mediante un adaptador a un puerto USB de la PC, se le da formato y pueden ser manipulados de la manera que mejor convenga.

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

4.3.1 Localización Geográfica

Texcoco se encuentra situada geográficamente en la parte este de Estado de México y colinda al norte con Tepetlaoxtoc, Papalotla, Chiautla, Chiconcuac; al sur con Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca; al oeste con Atenco; y al este con los estados de Tlaxcala y Puebla.

A los alrededores hay algunas elevaciones importantes, como el monte Tláloc con 4,500 msnm, que se extiende desde la comunidad de Santiago Cuautlalpan hasta San Jerónimo Amanalco; el cerro Tepechichilco en la comunidad de Tequexquinahuac; el cerro Tetzcutzinco en la comunidad de San Nicolás Tlaminca; el Tecuachacho en San Miguel Tlaixpan y el cerro de Moyotepec en San Jerónimo Amanalco. Asimismo se tiene el Cuatemulco, Tlapahuetzia, Apipilhuasco y Chiconcuayo. La mayor parte de estos cerros toman su nombre de la comunidad a la que pertenecen.

Existen también en el municipio varias cañadas que hacen al territorio algo accidentado.

Antiguamente el municipio gozaba de la gran laguna localizada al poniente de la cabecera municipal, que hasta el momento es alimentada por los riachuelos: el Cozacuaco, el Chapingo y el San Bernardino.



Figura 6 Imagen satelital publicada por Google Earth del área en la cual se estableció el experimento.

El estudio se realizó en el campo experimental de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo (Figura 6), situada geográficamente entre las coordenadas $19^{\circ} 16' 52''$ latitud Norte y $99^{\circ} 39' 0''$ longitud Oeste y a una altura promedio de 2250 msnm y perteneciente al municipio de Texcoco (Pulido y García, 2012).

4.3.2 Clima

El clima de la localidad es de tipo Cb(Wo)(W)(i')g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica que varía entre 5 a 7 ° C . La temperatura media anual es de 17.2 ° C, siendo mayo el mes más caliente con temperatura media de 19.7 ° C y enero el más frío con temperatura media de 14.1 ° C. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del sur.

Por su clima templado y su altura sobre el nivel del mar el municipio cuenta con una flora propia de estas regiones. Así se tiene en el Monte Tláloc árboles de las especies oyamel, encino, y otras coníferas, aunque no en cantidad suficiente para una explotación importante. Hace mucho se explotó sin ninguna consideración racional, convirtiendo sus árboles en vigas y morillos, ahora se sufren las consecuencias, para remediar esto y mejorar la alimentación de los mantos freáticos se está reforestando.

El clima es propicio para árboles como: pirul, sauce, fresno, nogal, tejocote, capulín, chabacano, olivo, manzano, higo, etc.

En cuanto a las plantas y flores, crecen: rosas, claveles, alcatraces, gladiolos, agapandos, nube, margaritas, margaritones, violetas, bugambilias, nardos, azucenas, etc.

Hace aproximadamente cincuenta años, se cultivan con propósito comercial: tulipán, pompón, crisantemo y clavel, con magníficos resultados.

Entre las comunidades dedicadas a estas actividades se tiene a San Simón, San José Texopan, San Diego, San Miguel Coatlinchan, San Miguel Tlaixpan, San Nicolás Tlaminca y otras.

Desde tiempos antiguos se recoge maíz, legumbres, trigo, cebada, alfalfa y zacatón, así como magueyes y nopales (Pulido y García, 2012).

4.3.3 Suelo

El suelo en el que se estableció el experimento y de acuerdo con el análisis de las propiedades físicas que realizó López (2008) corresponde a un franco arcilloso, con una densidad aparente que varía con la profundidad de 1.25 gr cm^{-3} a los 10 cm de profundidad y 1.36 gr cm^{-3} a los 30 cm de profundidad, con un contenido de humedad de 29.6% a capacidad de campo (CC) y un porcentaje de humedad de 16.5 a punto de marchitez permanente (PMP). Estas características físicas, hablan de un suelo con mediana a alta capacidad de retención de humedad; el espacio poroso varía de 0.47 a los 10 cm de profundidad y 0.43 a los 30 cm.

El pH del suelo es prácticamente neutro (6.99), relativamente pobre en materia orgánica (1.48%), medio en nitrógeno inorgánico (22.3 mg kg^{-1}), medio en fósforo asimilable (28.79 mg kg^{-1}), alto en potasio aprovechable (646 mg kg^{-1}),

moderadamente bajo en cobre asimilable (0.79 mg kg^{-1}), medio en zinc asimilable (1.44 mg kg^{-1}) moderadamente alto en magnesio asimilable (17.58 mg kg^{-1}), muy alto en boro asimilable (2.63 mg kg^{-1}).

4.3.4 Material vegetal

La clasificación taxonómica del nopal realizada por Briton y Rose citados por Bravo (1978).

Reino: Vegetal

Sub-reino: Embriophita

División: Angiosperma

Clase: Dicotiledonea

Subclase: Dialipetalas

Orden: Opuntiales

Familia: Cactaceae

Subfamilia: Opuntioideae

Tribu: Opuntiae

Género: opuntia

Especie: varios nombres

Nombre científico: *opuntia ficus indica* L. (Mill.)

Entre las variedades utilizadas en México para la producción de nopal verdura están la criolla tipo italiana, criolla, Tlaconopal, Copena F1, que dan muy

buenos resultados pero las que se consideran como variedades de excelente calidad son: Atlixco, Copena F1 y Milpa Alta. Instituto nacional de ecología (2014). (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/71/nverdura.html>) publicación en línea.

La variedad de nopal utilizada en este experimento es la Atlixco que se cultiva principalmente en Puebla y el Estado de México (Robles *et al.*, 2008). La planta madre se obtuvo de una de las plantaciones de la localidad de Otumba ubicada a 30 km del lugar del experimento perteneciente al estado de México y se encuentra localizada en el extremo oriente del Estado de México, las coordenadas extremas son: máximas 19° 33' 41" latitud norte y 99° 01' 45" longitud oeste; mínimas 19° 23' 40" latitud norte y 98° 34' 28" longitud oeste, a una altura de 2349.41 m.s.n.m. Limita al norte con el municipio de Axapusco; al sur con el municipio de Tepetlaoxtoc; al sureste con el estado de Tlaxcala; al este con el estado de Hidalgo y al oeste con el municipio de San Martín de las Pirámides.

En cuya localidad se tiene un clima Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad y humedad media. Los tipos de suelo son feozem, litosol, cambisol y vertisol. Y en donde se practica la agricultura de temporal predominantemente pero cuenta con riego.



Figura 7 Plantación de nopal verdura de donde se obtuvo la planta madre en la localidad de Otumba, Edo. de México.



Figura 8 Calidad de la planta de nopal verdura de donde se obtuvo la planta madre en la localidad de Otumba, Edo. De México.

La variedad Atlixco es considerada sin espinas con una alta resistencia a la falta de agua y con un crecimiento rápido y vigoroso lo que la hace una planta muy favorable (Figuras 7 y 8), normalmente se utiliza para la producción de nopal verdura, pero por su gran productividad en ocasiones se le utiliza para la producción intensiva de forraje en las zonas áridas y semiáridas del norte de la república (INIFAP, 2008).

La selección y corte de la planta madre se realizó el 12 de noviembre de 2013, esta actividad se llevo a cabo en un solo día para que la fecha de corte no fuera un factor de variabilidad en el experimento, en la selección de la planta se aplicaron criterios como edad, tamaño, vigor, aspectos de las plantas similares para contar con material experimental homogéneo, cabe aclarar que el corte lo realizó una sola persona, empleando el mismo criterio para no introducir variación en el material experimental.

4.4 MANEJO DE LA PLANTACIÓN

En la plantación del nopal verdura en las unidades experimentales se utilizó cladodios de aproximadamente un año de edad, establecidos en hileras orientadas norte a sur, con las caras de los cladodios hacia el este y oeste. La distancia entre las plantas fue de 50 cm y la separación entre hileras de 30 cm. La profundidad a la que se plantaron fue cubriendo un tercio de la parte basal del cladodio (Figura 9a y 9b).



a)



b)

Figura 9 Marco de plantación utilizado en el diseño experimental de nopal verdura.

Antes de iniciar con los riegos se le dio tiempo a la planta para que emitiera su sistema radicular.

Los tratamientos de humedad fueron asignados de manera aleatoria a cada microtúnel por lo que todas las parcelas chicas que están en un microtúnel recibieron la misma cantidad de agua mediante la aplicación de cuatro riegos distribuidos en un periodo de 10 días, en los riegos se aplicó una lámina de riego equivalente al porcentaje correspondiente al tratamiento de la evaporación del tanque tipo A ubicado a la intemperie. Para realizar esta actividad se instaló un sistema de riego automatizado Hunter X-Core que permite una aplicación exacta del agua si se programa el tiempo de riego en función del gasto de los emisores.

A mediados de septiembre se procedió a cerrar los microtúneles para aumentar la temperatura al interior de los mismos, para dar mayor confort a la planta de nopal y no se frenara la brotación.

Los deshierbes se realizaron manualmente e incluso se optó por no usar aperos de labranza como el azadón para evitar daños mecánicos a la planta ya sea por descuido o accidente.

Se efectuaron cortes de formación los cuales no fueron cuantificados con la intención de que todas las plantas de nopal en el experimento tuvieran una configuración parecida a las orejas de conejo.

La presencia de plagas fue prácticamente inexistente en los microtúneles y los brotes que se presentaron fueron principalmente de la grana cochinilla

(*Dactylopius coccus costa*) y el control se realizó en forma manual con una solución de agua, jabón y sal, mediante lavado de los cladodios contaminados.

Los cortes de los nopalitos tiernos se hizo utilizando un cuchillo regular a una distancia de aproximadamente 5 mm sobre la base del brote para evitar daños a la planta madre.

Para el peso de los brotes se utilizó una bascula granataria con una precisión de 0.1 g. La cual se consideró suficiente precisa para este tipo de trabajos en los que se evalúa la producción.

4.5 DEFINICIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE HUMEDAD Y FERTILIZACIÓN

4.5.1 Tratamientos de humedad

El agua en el suelo es fundamental porque para que las raíces puedan absorber los nutrientes estos deberán estar solubles en el agua del suelo formando una solución, sin humedad en el suelo los nutrientes no se solubilizan y no hay posibilidad de que la planta pueda absorberlos (Arévalo y castellano, 2009). El agua es fundamental en los procesos de respiración y transpiración de la planta.

Una de las variables a evaluar es la cantidad de agua aplicada, para lo cual se evaluaron 5 niveles en los que se incluye el testigo que corresponde al agua recomendada por aplicar y que se ha reportado en la bibliografía como la que ha proporcionado mejores resultados. En términos generales el tratamiento testigo se considera que es el 30% de la evaporación del lugar en el que se va a establecer el cultivo y para el caso de la región Chapingo este valor se calculó llevando un registro de la evaporación diaria apoyándose del personal de la estación meteorológica Chapingo y se acumuló la evaporación correspondiente a 10 días. Al total acumulado al final del periodo mencionado se le determinó los porcentajes de 20, 25, 30, 35, y 40% y fue el agua que se aplicó al cultivo en los 10 días siguientes, mientras se continuaba registrando la evaporación y se preparaba el siguiente acumulado para repetir el proceso.

Tomando en cuenta el criterio de Flores *et al.* (2004) que indican que la lámina de riego más apropiada para cultivar nopal es el 30% de la evaporación, se incluyó como testigo y se ensayaron dos tratamientos que comprendían más cantidad de agua sobre el testigo (35 y 40%) y dos tratamientos por debajo (20 y 25%).

Los volúmenes de riego por aplicar obtenidos mediante el procedimiento ya descrito se suministraron en cuatro aplicaciones con la finalidad de distribuir el agua y permitir una mejor absorción de esta por la planta.

La lámina de riego total aplicada en el periodo de 10 días se determinó de la siguiente manera:

Lámina (mm)= (% por aplicar) x Lámina evaporada (mm).

Al considerar la evaporación media anual de Chapingo que según registros es de 1545.1 mm la lámina testigo equivale a $1545.1 \times 0.30 = 463.53$ mm ó un volumen de $10000 \times 463.53 / 1000 = 4635.3$ m³, cantidad menor a la requerida por cultivos como el trigo y el maíz para la misma región, cuyos requerimientos de agua están alrededor de 550 mm ó 5500 m³ en los cuatro meses que dura su ciclo de cultivo calculado según el método de Blanney-Criddle presentado por Aguilera y Martínez (1990).

Para riego Luna (2011) recomienda 30 L m⁻² cada 20 días y no exceder 40 L m⁻² lo que es equivalente a: 547.5 mm al año. Indica que si se excede los 40 L m⁻¹ se incrementa el riesgo de la aparición de enfermedades.

Los tratamientos de humedad ensayados fueron de acuerdo con la siguiente simbología:

T1=20% de la evaporación del lugar.

T2=25% de la evaporación del lugar.

T3=30% de la evaporación del lugar (testigo).

T4=35 % de la evaporación del lugar.

T5=40% de la evaporación del lugar.

4.5.2 Tratamientos para la fertilización.

De los 16 elementos considerados esenciales para todas las plantas, nueve se requieren en grandes cantidades: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio magnesio y azufre y son conocidos como macronutrientes y entre estos se encuentra el nitrógeno. La deficiencia de cualquiera de estos macronutrientes reduce el crecimiento de la planta notablemente. Esta deficiencia se presenta frecuentemente en el caso del nitrógeno y el fósforo (Arévalo y castellano 2009). De los macronutrientes los tres primeros son suministrados principalmente por el agua y el aire mientras que el resto son suministrados por el suelo (Fuentes, 1994 citado por Arévalo y castellano 2009).

La bibliografía reporta poca información en este sentido y se toma como referencia las dosis ensayadas para el cultivo del nopal verdura en otras regiones principalmente en el norte de la república, también en el colegio de posgraduados se han ensayado las dosis 199-65-1015 en montecillos en el Estado de México. Para el altiplano potosino se recomienda 224 kg de nitrógeno por hectárea (INIFAP, 2008).

Orona en el 2004, realizó una extracción mineral a los cladodios del nopal como un indicador de las necesidades nutrimentales de este cactus indicando que el suelo debe de suministrar 179-68-1025 kg de N P K.

En función de las dosis de fertilización reportadas para la producción de nopal por diferentes autores para otras zonas se define las dosis de fertilización nitrogenada a ensayar, en este trabajo de investigación que son las siguientes:

F0=00-00-00

F1=100-00-00

F2=200-00-00

F3=300-00-00

Se utilizó urea como fertilizante para aportar el nitrógeno de acuerdo a las dosis anteriores, la urea contiene un 46% de nitrógeno, dato necesario para realizar el cálculo de las cantidades a aplicar, por ejemplo para agregar 100 kg de nitrógeno es necesario aplicar $100/.46=217.39$ kg de urea.

4.6 CONSTRUCCIÓN DE MICROTÚNELES

Las plantas se ubicaron a cobijo de los microtúneles cuyos componentes son esencialmente tres: arcos, cobertura y sujeción de la cobertura. En cuanto a las dimensiones, éstas pueden ser variables dependiendo del cultivo que van a proteger y el tamaño debe ser el mínimo para cubrir a la planta y permitir realizar las actividades necesarias de cultivo y la cosecha; así mismo se recomienda que el largo de una estructura de esta naturaleza no supere los 30 m.

La construcción de microtúneles se realizó en el periodo comprendido de diciembre de 2013 a enero 2014 por una compañía externa, el ancho de los mismos es de 2 m. y la altura de 2 m. de acuerdo a la figura 10.

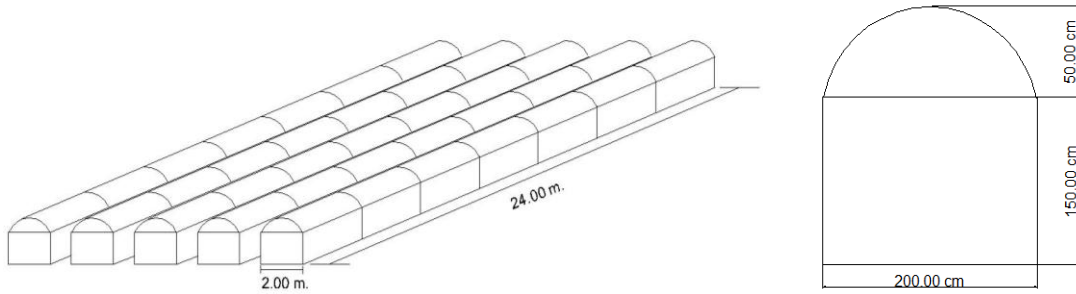


Figura 10 Estructura de los microtúneles orientados norte-sur.

En las figuras 11 a) y 11 b) se puede ver los trabajos realizados para el anclaje de los microtúneles y el proceso de construcción de los mismos y en la figura 12 se aprecia los microtúneles terminados.



Figura 11 Trabajos necesarios para la construcción de los microtúneles a) trabajos para anclaje y b) instalación de los arcos.



Figura 12 Vista de los microtúneles terminados.

4.7 PLANTACIÓN DEL NOPAL VERDURA

El establecimiento de la planta madre se realizó el 13 de enero de 2014 y a los 14 días de trasplantadas empezaron a emitir sus primeras raíces (Figura 13). Es importante hacer notar que el 7% de los cladodios de nopal plantados en los microtúneles no tuvieron éxito debido a causas de manejo principalmente y fue necesario reemplazarlos, lo cual es normal, en las plantaciones, no todas las plantas enraízan y continúan su desarrollo (Figura 14), el reemplazo se hizo con plantas que sobraron y fueron consideradas para este fin.



Figura 13 Brotación de las primeras raíces de la planta madre a los 14 días de trasplantadas.



Figura 14 Cladodios de la planta madres que no tuvieron éxito al ser plantados.

4.8 INSTALACIÓN DE LOS SENSORES Y EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Después de la construcción de los microtúneles, la instalación del sistema de riego y la plantación de la planta madre, se procedió a instalar el sistema de adquisición de datos de temperatura y humedad relativa desarrollado, el cual desde recién iniciada la plantación empezó a llevar un registro de las variables indicadas cada hora durante las 24 horas del día, los sensores de humedad y temperatura se ubicaron a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo en el interior de un protector contra radiación solar diseñado por Hernández (2009) a base de platos de plástico blanco (Figura 15). Los datos medios diarios se presentan en una serie de gráficas en el anexo 1.



Figura 15 Instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa HMZ433A1 dentro de un microtúnel.

Los datos de temperatura y humedad relativa medidos por los dispositivos HMZ433A1 utilizados, previamente se compararon con los datos de la estación automatizada de la estación meteorológica Chapingo, los datos y la gráfica que se generaron se presentan en la figura 16. Se aprecia la similitud entre ellos, lo que da cierta seguridad en su uso.

Los coeficientes de correlación entre la lectura que se midió con los HMZ433A1 y la estación automatizada son:

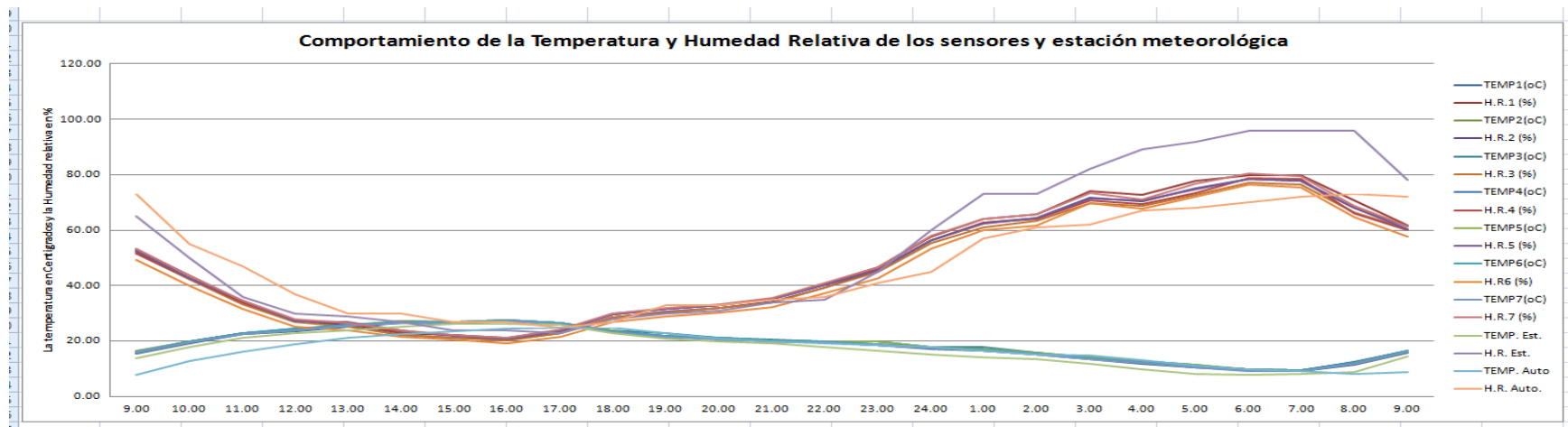
Para temperatura coeficientes de correlación próximos a .85 y para humedad relativa coeficientes de correlación próximos a .90

Se considera que coeficientes de correlación mayores a .8 da un buen ajuste y se consideran datos confiables.

Se utilizaron siete dispositivos, uno para cada uno de los microtúneles utilizados en el experimento y uno más para un microinvernadero con fines demostrativos y uno para ser colocado a la intemperie.

	TEMP1(oC)	H.R.1 (%)	TEMP2(oC)	H.R.2 (%)	TEMP3(oC)	H.R.3 (%)	TEMP4(oC)	H.R.4 (%)	TEMP5(oC)	H.R.5 (%)	TEMP6(oC)	H.R.6 (%)	TEMP7(oC)	H.R.7 (%)	Datos estacion		Datos Automatica	
	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Est.	H.R. Est.	TEMP. Auto	H.R. Auto.
9.00	15.59	52.85	15.92	52.35	16.11	51.73	16.11	51.68	16.35	52.50	16.20	49.30	15.84	53.19	13.90	65.00	7.80	73.00
10.00	19.18	43.49	19.62	42.52	19.71	42.16	19.79	42.68	19.97	42.61	19.71	39.91	19.36	43.49	17.70	50.00	12.70	55.00
11.00	22.44	34.32	22.71	33.75	22.88	33.40	22.97	33.99	22.97	34.50	22.88	31.67	22.53	34.60	21.30	36.00	16.10	47.00
12.00	23.53	27.62	23.77	27.70	23.95	26.75	24.40	27.42	24.13	27.11	24.40	25.11	23.77	27.78	22.90	30.00	18.90	37.00
13.00	25.21	26.17	25.44	25.65	25.66	25.36	25.66	26.70	25.75	26.90	25.75	23.92	25.39	26.65	24.00	29.00	21.20	30.00
14.00	26.62	22.90	26.89	22.25	27.12	22.22	27.30	23.17	27.12	23.80	26.95	21.39	26.66	23.83	25.10	27.00	22.40	30.00
15.00	26.21	22.10	26.66	21.23	26.75	21.22	26.61	22.30	26.88	21.72	26.84	20.60	26.39	22.31	26.10	24.00	23.60	27.00
16.00	27.12	20.84	27.30	20.43	27.55	20.24	27.49	21.10	27.58	20.76	27.58	19.15	27.21	21.22	26.20	24.00	24.40	27.00
17.00	26.11	23.79	26.48	22.78	26.66	22.79	26.39	23.81	26.57	23.62	26.48	21.56	26.11	24.16	25.90	23.00	24.80	25.00
18.00	23.33	29.64	23.66	28.48	23.86	28.46	23.51	29.74	23.77	29.48	23.68	26.80	23.24	29.96	22.80	28.00	24.80	27.00
19.00	21.64	31.52	21.91	30.56	22.90	30.33	21.73	31.63	21.10	31.42	21.91	28.75	21.54	31.95	20.90	30.00	22.80	33.00
20.00	20.76	32.91	21.30	31.95	21.20	31.74	20.85	32.96	21.11	32.83	21.30	30.13	20.67	33.34	19.90	31.00	20.90	33.00
21.00	19.88	35.30	20.23	34.11	20.37	33.87	19.97	35.30	20.32	35.10	20.15	32.21	19.71	35.56	19.10	34.00	19.80	35.00
22.00	19.49	40.51	19.71	39.43	19.97	39.11	19.62	40.36	19.89	40.26	19.79	37.15	19.44	40.89	17.70	35.00	19.30	36.00
23.00	18.49	46.60	18.92	45.60	19.80	44.91	18.65	45.85	19.90	45.70	19.00	42.55	18.48	46.76	16.50	45.00	18.60	41.00
24.00	17.25	57.82	17.69	56.48	17.90	55.47	17.60	56.20	17.96	56.30	17.87	53.22	17.34	57.99	15.00	60.00	17.70	45.00
1.00	16.45	63.90	16.81	62.60	17.80	61.14	16.90	62.60	17.30	62.50	16.91	59.98	16.52	64.17	14.10	73.00	16.40	57.00
2.00	15.15	65.73	15.50	64.50	15.76	63.51	15.59	63.95	15.76	64.31	15.62	61.80	15.15	65.78	13.50	73.00	15.20	61.00
3.00	13.38	74.21	14.00	71.80	14.18	69.85	13.93	70.64	14.20	71.40	13.84	69.70	13.41	73.56	11.70	82.00	14.90	62.00
4.00	11.96	72.62	12.51	70.41	12.86	68.70	12.79	69.37	12.65	70.90	12.63	67.80	12.16	71.10	9.80	89.00	13.00	67.00
5.00	10.37	77.82	10.99	75.20	11.27	72.84	11.60	73.35	11.50	74.66	10.98	72.10	10.53	76.88	8.00	92.00	11.10	68.00
6.00	9.36	79.83	9.72	78.52	9.90	77.23	9.45	78.84	9.81	78.50	9.66	76.37	9.27	80.44	7.70	96.00	9.90	70.00
7.00	8.99	79.69	9.36	77.90	9.62	76.56	9.31	78.40	9.47	77.87	9.45	75.50	8.99	79.52	8.00	96.00	9.00	72.00
8.00	11.34	70.66	11.96	68.23	12.44	66.41	12.51	66.18	12.31	67.94	12.24	64.56	11.95	68.88	8.90	96.00	8.20	73.00
9.00	15.84	61.59	16.19	61.23	16.47	60.20	16.55	59.91	16.64	60.47	16.46	57.75	16.20	61.51	14.50	78.00	8.90	72.00

(a)



(b)

Figura 16 Datos obtenidos con los siete sensores en operación y datos medidos en la estación meteorológica Chapingo (a) y gráfica generada (b) para un día en particular (25 de febrero de 2014).

4.9 MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN EL INTERIOR DE LOS TÚNELES Y A LA INTEMPERIE

Para el caso de la contabilidad de la evaporación de la cual se aplicó un porcentaje al suelo de acuerdo a los diferentes niveles del factor de humedad considerados en este trabajo de investigación, se contó a escasos metros del experimento con la estación meteorológica Chapingo, así mismo se instaló un tanque tipo A en el interior de un invernadero alejado a los microtúneles (Figura 17), esto para medir la evaporación que ocurre dentro del invernadero y ver su comportamiento con respecto al ubicado en el exterior.



Figura 17 Tanque tipo A en el interior de un invernadero cercano a los microtúneles para medir la evaporación diaria.

Los datos obtenidos de la medición de la evaporación al interior del invernadero y a la intemperie se muestran en la figura 18 para el mes de mayo, en la que se puede ver que la evaporación a la intemperie es mayor que en el interior del invernadero. Al obtener los promedios generales tanto al interior como a la intemperie se obtiene:

Promedio a la intemperie=3.8 mm

Promedio al interior del invernadero= 2.2 mm

Diferencia =3.8-2.2 =1.6 mm

Los datos graficados de la evaporación al interior del invernadero utilizado y la evaporación a la intemperie en mm para los meses en los cuales se llevó a cabo el experimento se presentan en el anexo 2.

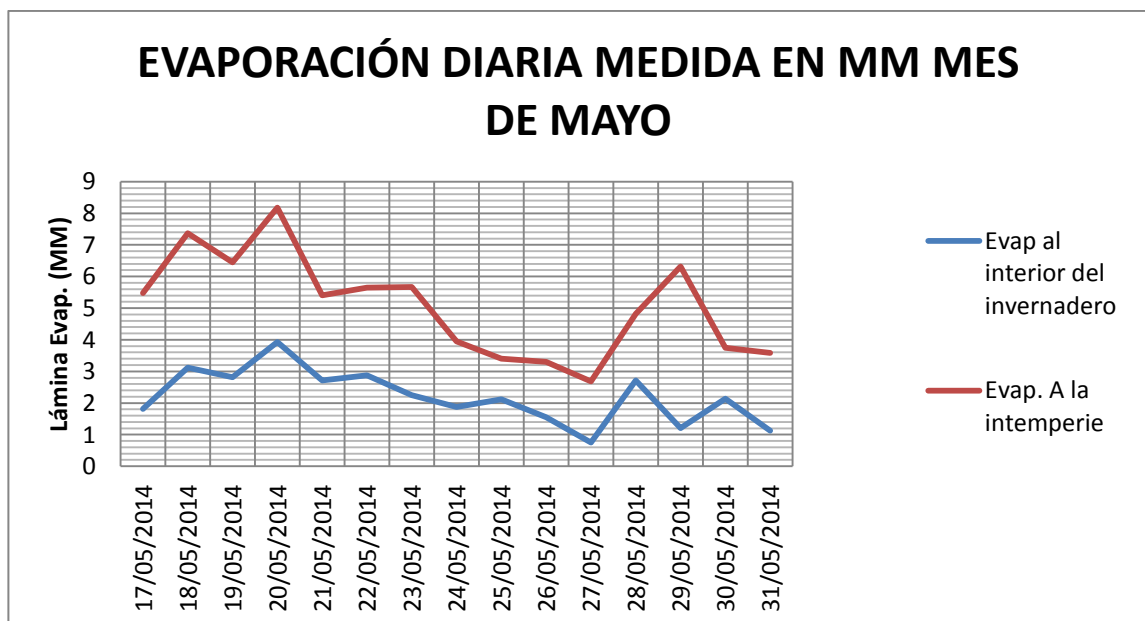


Figura 18 La evaporación medida al interior del invernadero y a la intemperie.

4.10 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

El seguimiento de la humedad del suelo en las inmediaciones de raíz de la planta del nopal se llevó a cabo mediante el sensor de humedad HL-69 compatible con la plataforma arduino UNO, En el laboratorio de electrónica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo se calibró para el tipo de suelo en el que se estableció el experimento (Figura 19), este dispositivo utiliza la conductividad eléctrica entre dos terminales separadas a una distancia determinada para determinar la humedad del suelo, trabaja a 5V, Si existe humedad en el suelo se creará un puente entre una punta y otra, lo que será detectado por un circuito de control con un amplificador operacional que será el encargado de transformar la conductividad registrada a un valor analógico que podrá ser leído por Arduino. Se tomaron varias muestras de suelo las que se saturaron y se pesaron. Las muestras de suelo se dejaron secar al ambiente tiempo en el que diariamente se les determinó la lectura con el sensor de humedad y el peso, después de secar la muestra al horno y por el método gravimétrico se determinó el contenido de humedad del suelo en cada momento en el que se tomó la lectura del sensor de humedad HL-69 esto permitió determinar la curva de calibración figura 20.



Figura 19 Calibración de los sensores de humedad del suelo (HL-69).

Con la capacidad de cálculo disponible en el arduino es posible manejar fácilmente una ecuación cúbica como la que se ajustó a los datos de humedad del suelo y el valor analógico obtenido en el sensor HL-69 obtenidos en la calibración.

La determinación de la humedad del suelo sólo se llevo a cabó en algunas plantas y se hizo en algunas ocasiones puesto que para censar permanentemente es necesario un gran número de sensores lo cual lo hace prohibitivo, pero fue útil para determinar el patrón de distribución de la humedad de manera espacial.

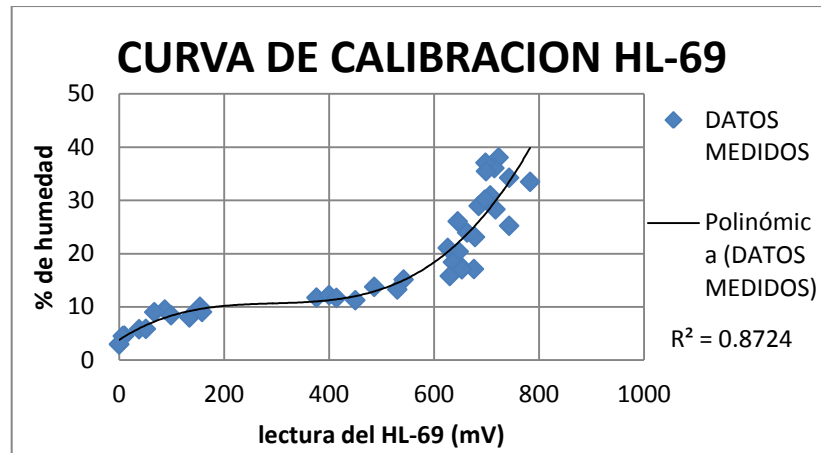


Figura 20 Curva de calibración obtenida de manera experimental para el sensor de humedad del suelo HL-69

La curva más adecuada para ajustar los datos de acuerdo a la técnica de mínimos cuadrados que se encontró es:

$$Y=0.0000002 X^3-0.0002X^2+0.0643X+3.7886 \text{ con una } R^2=0.8724.$$

Donde:

Y (% de humedad del suelo)

X (valor analógico del sensor en Volts)

El modelo anterior fue calibrado para el tipo de suelo que se utilizó en este trabajo, si se pretende utilizar este dispositivo en un tipo de suelo con características diferentes, deberá de obtenerse la curva de calibración que corresponda al suelo o sustrato en cuestión.

Con esta fórmula y la lectura del sensor se pudo estimar el contenido de humedad del suelo en unos minutos evitándose así la espera a la que se está sujeto cuando se utiliza el método gravimétrico para determinar el porcentaje de

humedad del suelo. Lo anterior se programó en el arduino UNO y este hace la lectura y procesa el dato para generar el % de humedad del suelo directamente para almacenarlo en la memoria.

Con la implementación de estos dispositivos fue posible estimar la humedad del suelo y tener una idea de su distribución en el suelo a través del tiempo y del espacio, se censo cada tercer día para conocer la humedad media. Con la implementación de una cuadrícula con una separación entre nodos de 10 cm. Fue posible lograr un mapeo del contenido de humedad y su distribución en el suelo con apoyo del programa Surfer 8.0 (Figura 21).

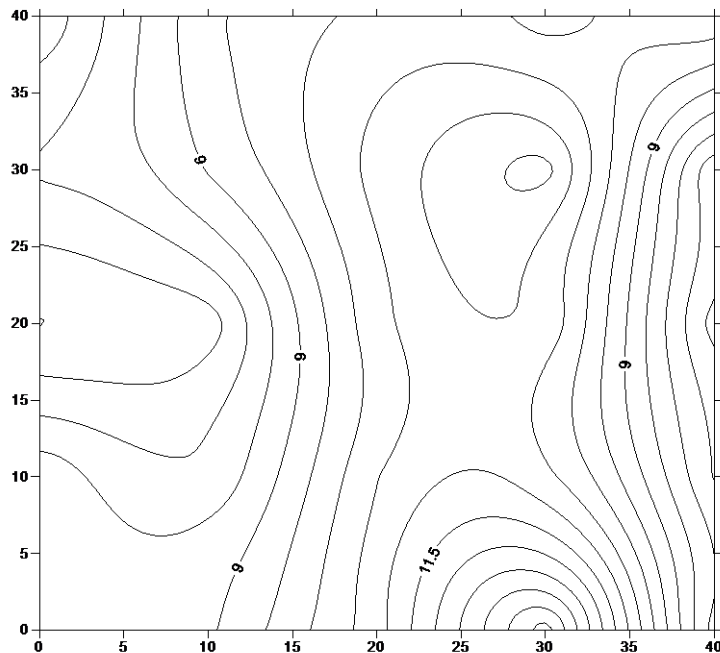


Figura 21 Distribución del agua en el suelo en porcentaje, datos promedio de la profundidad de los primeros 12 cm del suelo.

Se dio seguimiento a la humedad del suelo durante 15 días a una planta previamente seleccionada de cada microtúnel, para ver la evolución del contenido de humedad del suelo para cada uno de los tratamientos de humedad, los datos se presentan en el anexo 3. En los cuales se puede apreciar que la humedad del suelo es muy dinámica y está en constante movimiento en función del punto de aplicación de riego, condiciones atmosféricas, las propiedades del suelo, el cultivo establecido, edad, etc.

4.11 DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS GRANDES Y CHICAS

Una vez establecida la plantación se procedió a dividir las parcelas grandes en parcelas pequeñas, en las parcelas grandes se ensayó el tratamiento de los niveles de humedad y en las parcelas pequeñas los subtratamientos de fertilización de acuerdo a la siguiente distribución figura 22.

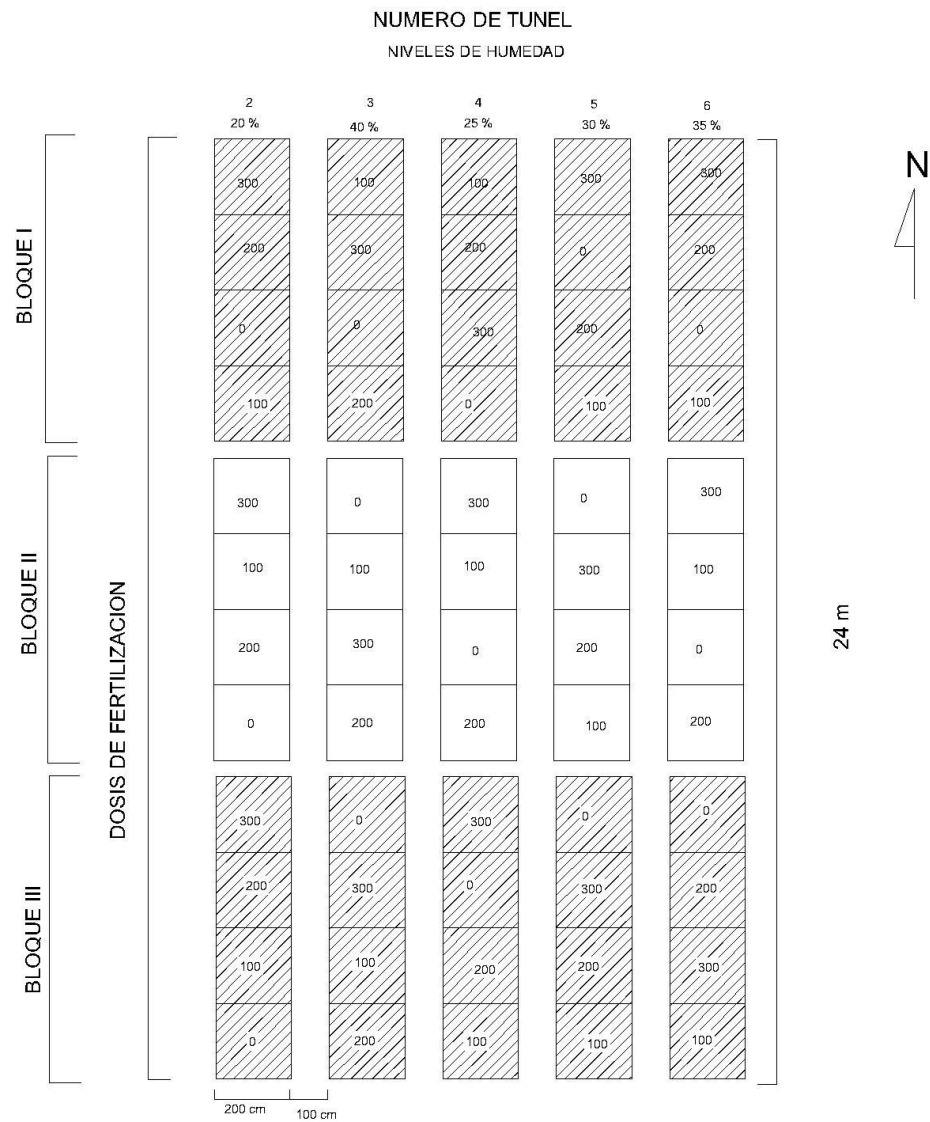


Figura 22 Distribución de los tratamientos de humedad y las dosis de fertilización nitrogenada al interior de los microtúneles.

4.12 LOS CORTES

Al nopal se le practicaron cortes de manera regular, se cortaban los brotes cuando alcanzaban una longitud promedio de 17 cm y una ancho de 9 cm, con

estas dimensiones el área de una de las caras del nopal esta alrededor de 110 cm². Se cuantificó el peso de biomasa producida en el periodo entre cortes. Los periodos de muestreo fueron de 1 a 2 semanas. Se hizo el análisis estadístico para tratar de encontrar diferencias significativas desde el primer corte después de la aplicación de los tratamientos. Los tratamientos se aplicaron el 31 de mayo del 2014 y el 14 de junio se hizo la primera cuantificación de la producción (Figura 23).



Figura 23 Material obtenido en uno de los cortes realizados (14 de junio 2014).

4.13 VARIABLES RESPUESTA

4.13.1 Rendimiento

La variable respuesta a analizar fue esencialmente biomasa (incluye peso fresco) en cuanto a producción total. Los cortes se realizaron en un horario de 10 a 12 horas de la mañana, de cada una de las parcelas experimentales se pesó la totalidad de los nopalitos tiernos producidos. Con estos datos y de acuerdo al análisis estadístico de la varianza que corresponde al diseño experimental usado definir si hay diferencias significativas al 5 % de significancia.

4.14 CONSUMO DE AGUA

La aplicación de los riegos se realizó una vez calculada la lámina de riego a aplicar, la correspondiente a un porcentaje determinado de la evaporación del tanque tipo A el cual se encontró ubicado a escasos 100 metros del lugar en el que se estableció el experimento.

Se determinó el coeficiente de uniformidad del sistema de riego haciendo la evaluación correspondiente y basándonos en los criterios que documenta Martínez (1991).

4.15 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de la varianza se realizó con el apoyo del software Matlab el cual tiene una caja de herramientas para el análisis estadístico, la separación de medias se realizó con apoyo de la hoja de cálculo de Excel, lo anterior con la finalidad de minimizar la posibilidad de errores numéricos, el análisis de los supuestos de normalidad y varianza con R.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

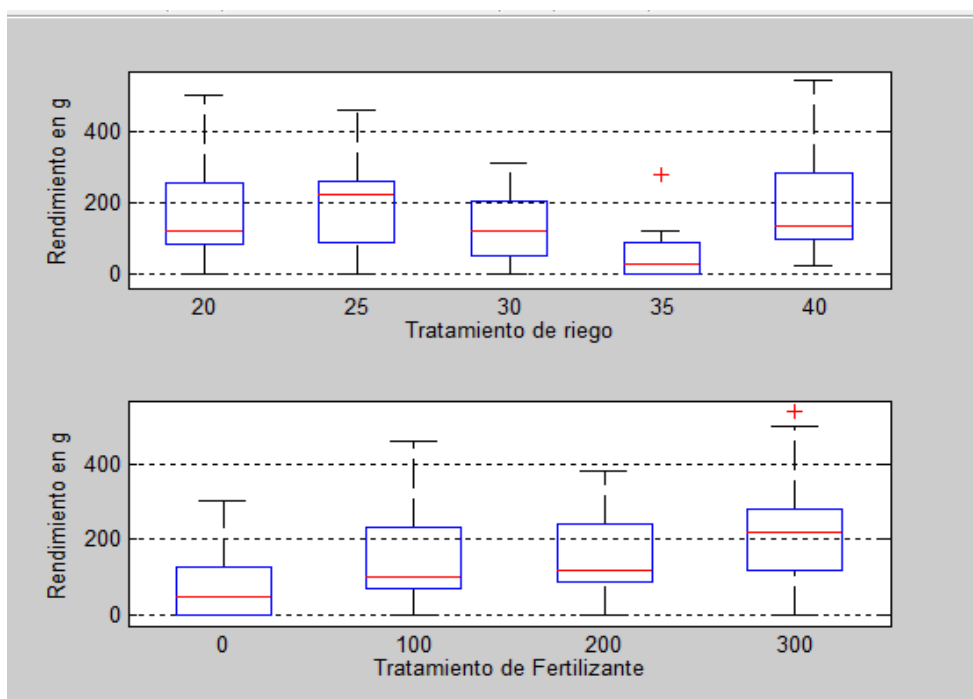
En la tabla 5 se presenta las láminas evaporadas totales a la intemperie y las láminas que se repusieron a los tratamientos ensayados en esta investigación, las láminas aplicadas se dividieron en cuatro riegos.

Tabla 5 láminas de agua evaporadas a la intemperie y las láminas repuesta al cultivo del nopal en el periodo indicado.

PERIODO	LAMINA (mm) APLICADA A LOS NIVELES DE HUMEDAD					EVAPORACION REGISTRADA
	20%	25%	30%	35%	40%	
31 de mayo al 8 de junio	6.06	7.57	9.09	10.60	12.12	30.29
8 de junio al 16 de junio	5.87	7.34	8.81	10.28	11.75	29.37
16 de junio al 25 de junio	6.90	8.62	10.35	12.07	13.80	34.49
25 de junio al 4 de julio	4.35	5.43	6.52	7.61	8.69	21.74
4 de julio al 14 de julio	5.87	7.34	8.81	10.27	11.74	29.35
14 de julio al 24 de julio	7.41	9.27	11.12	12.97	14.82	37.06
24 de julio al 3 de agosto	7.57	9.46	11.36	13.25	15.14	37.85
3 de agosto al 16 de agosto	9.20	11.50	13.79	16.09	18.39	45.98
16 de agosto al 26 de agosto	6.86	8.58	10.30	12.01	13.73	34.32
26 de agosto al 5 de sep.	6.97	8.71	10.45	12.19	13.94	34.84
5 de sep. al 18 de sep.	7.48	9.35	11.22	13.09	14.96	37.39
18 de sep. al 28 de sep.	8.84	11.06	13.27	15.48	17.69	44.22
28 de septiembre al 8 de octubre	7.51	9.38	11.26	13.14	15.01	37.53
8 de octubre al 19 de octubre	7.59	9.48	11.38	13.28	15.17	37.93
19 de octubre al 29 de octubre	5.54	6.93	8.31	9.70	11.08	27.70
29 de octubre al 9 de noviembre	5.84	7.30	8.76	10.22	11.68	29.20

La aplicación de la lámina se realizó en 4 riegos distribuidos en el periodo respectivo

Del análisis realizado en el primer corte a los 15 días después de la aplicación de los tratamientos, se pudo determinar que el nopal verdura responde a las variaciones en humedad y fertilización nitrogenada. Se muestra el diagrama de cajas en la figura 24. El análisis de varianza se incluye en la Tabla 6.



Generada en matlab 2012.

Figura 24 Diagrama de cajas del análisis del primer corte realizado el 14 de junio 2014

Tabla 6 Análisis de varianza a los 15 días de aplicados los tratamientos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	FT	
BLOQUES	20442.4	2	10221.20	1.27	4.46	
RIEGO	171028.9	4	42757.23	5.31	3.84	**
INT. BLOQUESxRIEGO	64431.1	8	8053.89			
Subtotal	255902.4	14				
FERTILIZACION N	174037.9	3	58012.63	3.35	2.92	**
INT. RIEGOXFERTIL.	90579.1	12	7548.26	0.44	2.09	
Error Subparcelas	519374.5	30	17312.48			
Totales	1039893.9	59				

** indica diferencias significativas al nivel 5%

En la Tabla 6 se puede ver que las fuentes de variación analizadas al menos a este momento no tienen efecto sobre el rendimiento las interacciones entre bloquesXriego y riegoXfertilización.

Al existir diferencias significativas en el análisis de varianza, no se sostiene la hipótesis de que todas las medias son iguales y se procede a la separación de medias tanto para la humedad como para la aplicación de fertilizante.

Separación de las medias de porcentaje de humedad de acuerdo al método de Tukey y utilizando la tabla 8 del libro de Montgomery (2013) para la obtención del cuantil de la distribución de Tukey el cual está en función del número de medias por comparar y los grados de libertad del error, dicho análisis se presenta en la tabla 7, donde se ve que hay diferencias significativas del nivel de humedad de 35 %. Del mismo análisis se deriva que estadísticamente 20, 25, 30 y 40% de humedad son iguales.

$N(\text{número de repeticiones por muestra}) = 12$

$a(\text{número de medias}) = 5$

$G_{\text{error}}(\text{grados de libertad del error}) = 8$

$q(a, G_{\text{error}}) = 4.89$

$T_{0.05} = 126.68$

Tabla 7 Separación de medias por el método de Tukey para el factor humedad.

	35.00	30.00	25.00	40.00	20.00
	57.50	131.50	194.17	198.33	183.33
20	125.83	51.83	10.83	15.00	0.00
40	140.83	66.83	4.17	0.00	
25	136.67	62.67	0.00		
30	74.00	0.00			
35	0.00				

Para el caso del factor fertilización se presenta la separación de medias por el método de Tukey en la tabla 8, donde se aprecian diferencias significativas pero la única conclusión que se puede emitir es que el nopal tiene una respuesta a la fertilización, puesto que de la interpretación de la tabla 8 se puede ver que la dosis de fertilización de 300 kg ha⁻¹ de Nitrógeno tiene una diferencia significativa con respecto a la no aplicación de Nitrógeno, pero a la vez se concluye que estadísticamente es lo mismo si se aplica 100, 200 o 300 kg ha⁻¹ de Nitrógeno. De lo anterior se puede indicar que 15 días después de la aplicación de los tratamientos de humedad y fertilización bajo las condiciones del experimento es poco probable diferenciar el efecto de los tratamientos de fertilizante usados.

N (número de repeticiones por muestra) = 15

a (número de medias) = 4 Glerror(grados de libertad del error)=30

q(a, Glerror) = 3.85

T_{0.05}=130.80

Tabla 8 Separación de medias de la fuente de variación debido a la fertilización.

	0	100	200	300
	76.67	140.40	168.47	226.33
300	149.67	85.93	57.87	0.00
200	91.80	28.07	0.00	
100	63.73	0.00		
0	0.00			

En las figuras 25 y 26, se presentan las funciones de respuesta del nopal verdura en función del % de agua aplicada y la dosis de fertilización aplicada respectivamente, Aun cuando los R^2 son bajos por la dispersión de los rendimientos obtenidos en el experimento, para la función de respuesta en función del agua se puede apreciar que existe un máximo, cosa que no sucede en la función de respuesta a la fertilización nitrogenada en la cual se tiene una tendencia ascendente.

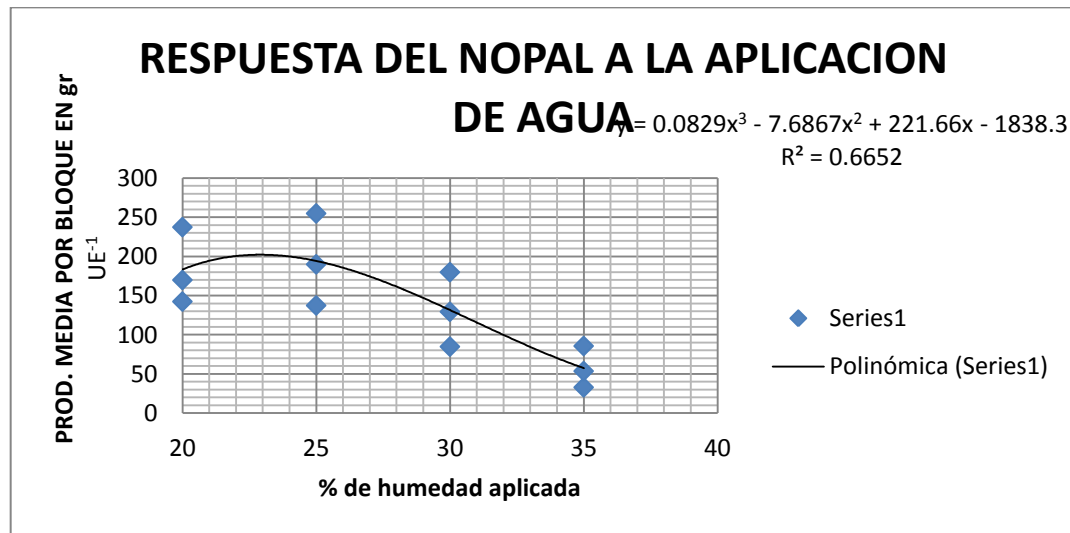


Figura 25 Gráfica de la producción media por bloque en función del % de humedad aplicado.

Al elaborar la grafica presentada en la figura 25 se desecho el valor de producción correspondiente a la aplicación de 40% de humedad por considerarlo fuera de todo rango, lo que refleja algún problema en el manejo de la información.

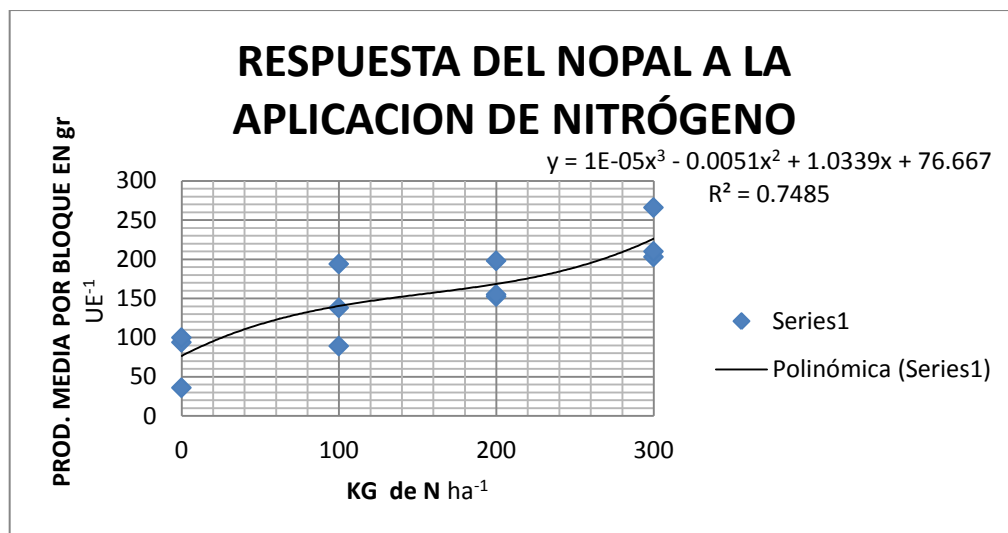


Figura 26 Gráfica de la producción media por bloque en función de la cantidad de nitrógeno aplicada.

Al estar la plantación anclada en el suelo y bajo los microtúneles la incidencia de lluvia fue una de las fuentes de variación que no se controló, al presentarse las lluvias se generaron escurrimientos que afectaron la aplicación de agua controlada y al mismo tiempo se perturbó la aplicación del nitrógeno, en la figura 27 se muestra la precipitación total a nivel diario registrada durante el período de observación del experimento.

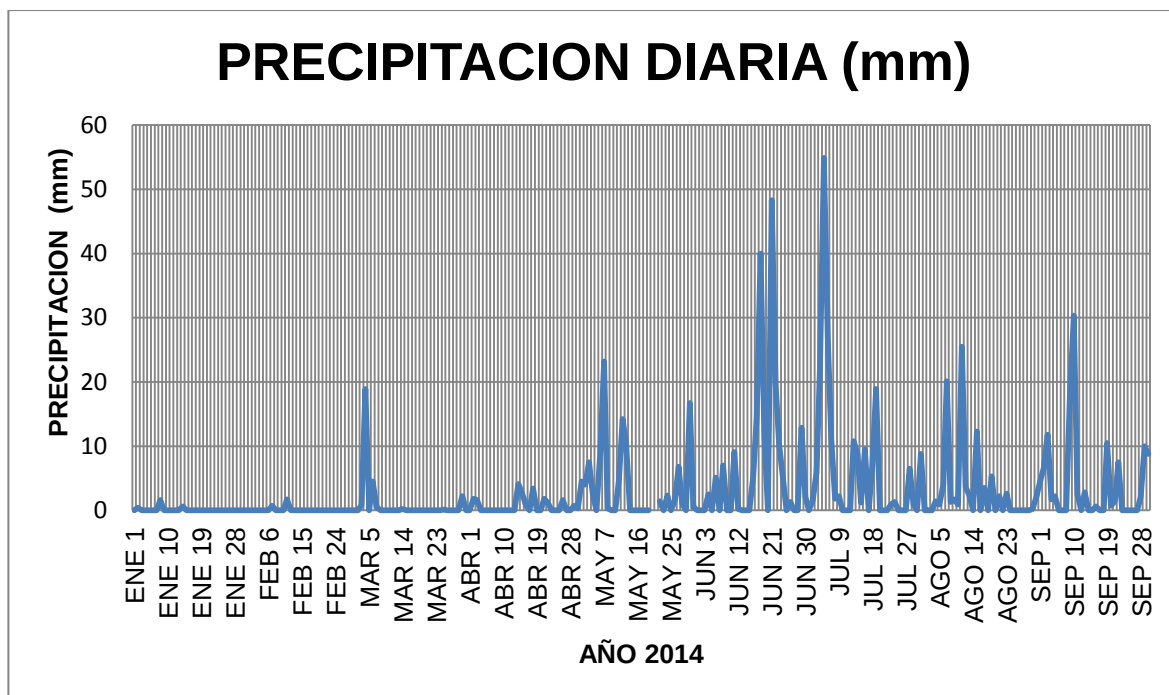
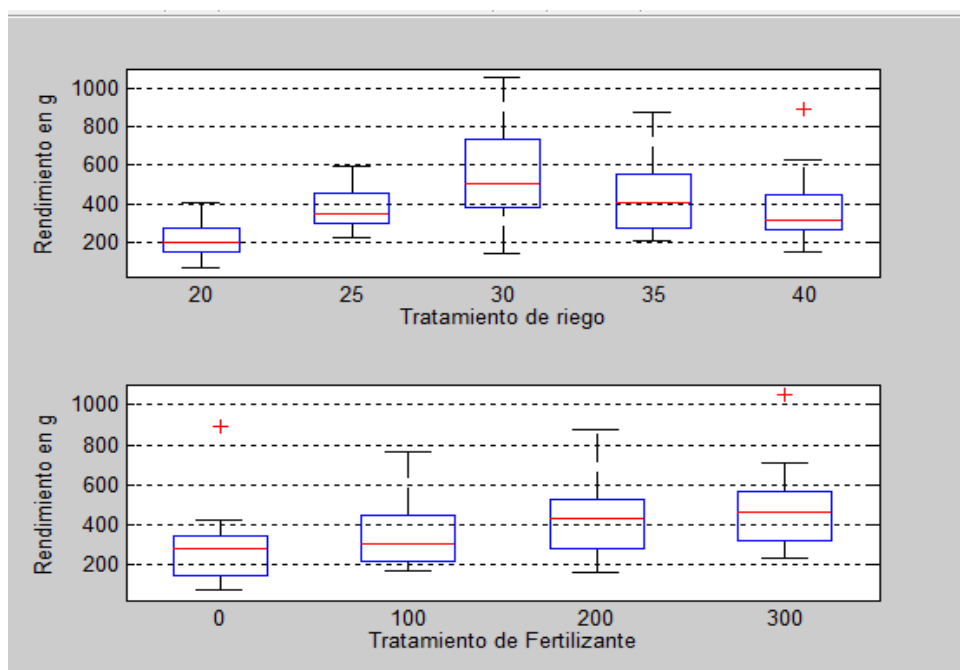


Figura 27 Gráfica de la precipitación total en mm registrada de enero a septiembre por la estación meteorológica Chapingo en el año 2014.

Para tratar de precisar con mayor detalle los niveles más ventajosos de los factores de variación estudiados en este trabajo se monitoreo el tiempo en el que los escurrimientos provocados por la lluvias no incidieran mucho en el resultado y se procedió a realizar otra evaluación misma que se presenta a continuación, el análisis de varianza (Tabla 9) y el diagrama de cajas en la figura 28.



Generada en matlab 2012.

Figura 28 Diagrama de cajas del segundo corte analizado.

Tabla 9 Análisis de varianza a los brotes producidos del 17 de agosto al 21 de septiembre.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0	FT	
BLOQUES	96178.1	2	48089.05	1.22	4.46	
RIEGO	662526.3	4	165631.58	4.19	3.84	**
INT. BLOQUESxRIEGO	316237.2	8	39529.65			
Subtotal	1074941.6	14				
FERTILIZACION N	364372.3	3	121457.43	4.84	2.92	**
INT. RIEGOxFERTILIZANTE	245733.2	12	20477.77	0.82	2.09	
Error Experimental	752824.3	30	25094.14			
Totales	2437871.3	59				

* indican las diferencias significativas al 5% de probabilidad de excedencia.

Se aprecia que hay diferencias significativas tanto para humedad como fertilización y que no hay interacción entre estos dos factores.

De igual modo al existir diferencias significativas al 5% de probabilidad de excedencia no se sostiene la hipótesis de que todas las medias son iguales y se procede a la separación de las medias.

N (número de repeticiones por muestra) = 12

a (número de medias) = 5 Gl_{error} (grados de libertad del error)=8

$q(a, Gl_{error}) = 4.89$

$T_{0.05} = 280.66$

Tabla 10 Separación de medias por el método de Tukey para los niveles de humedad.

	35	30	25	40	20
	431.51	537.72	378.52	381.39	212.59
20	218.9141667	325.13	165.92	168.80	0
40	50.11916667	156.34	2.87	0	
25	52.99083333	159.21	0		
30	106.2158333	0			
35	0				

De la tabla 10 se infiere que la media de producción del nivel 30% de humedad tiene diferencias significativas al ser comparado con la media del 20% de humedad, y aun cuando las medias de 25, 30, 35 y 40% son estadísticamente iguales, se ve que la media de 30% es la que produce más biomasa.

Al compararse la medición de la evaporación al interior del invernadero y a la intemperie, se obtiene que la medición al interior de los microtúneles es en promedio 1.9 mm menor que la observada a la intemperie, y al ser las aplicaciones de agua calculadas con respecto a la observada a la intemperie,

tiene sentido que el análisis de varianza indique que con aplicaciones de agua del 25% de la evaporación a la intemperie se pueden obtener buenos resultados.

De igual manera se presenta la separación de medias para los niveles del factor fertilización en la tabla 11.

N (número de repeticiones por muestra) = 15

a (número de medias) = 4 G_{error} (grados de libertad del error)=30

$q(a, G_{\text{error}}) = 3.85$

$T_{0.05} = 157.47$

Tabla 11 Separación de medias por el método de Tukey para los niveles del factor fertilización nitrogenada.

	0	100	200	300
	289.69	338.48	439.77	485.44
300	195.75	146.96	45.67	0
200	150.08	101.29	0	
100	48.79	0		
0	0			
		200		

De la tabla 11 se puede ver que los niveles que manifiestan diferencias significativas son el 200 y 300 kg ha⁻¹ de nitrógeno con la media de 0 kg ha⁻¹ de nitrógeno pero de igual manera se muestra que 100, 200 y 300 kg ha⁻¹ de nitrógeno son estadísticamente iguales por lo que una dosis de 100 kg ha⁻¹ de nitrógeno es factible de aplicarse.

En la figura 29 se incluye la función de respuesta del nopal, considerando que el % de agua aplicado es la variable independiente. En dicha gráfica se puede apreciar que existe un porcentaje óptimo (31.95) después del cual la producción decrece.

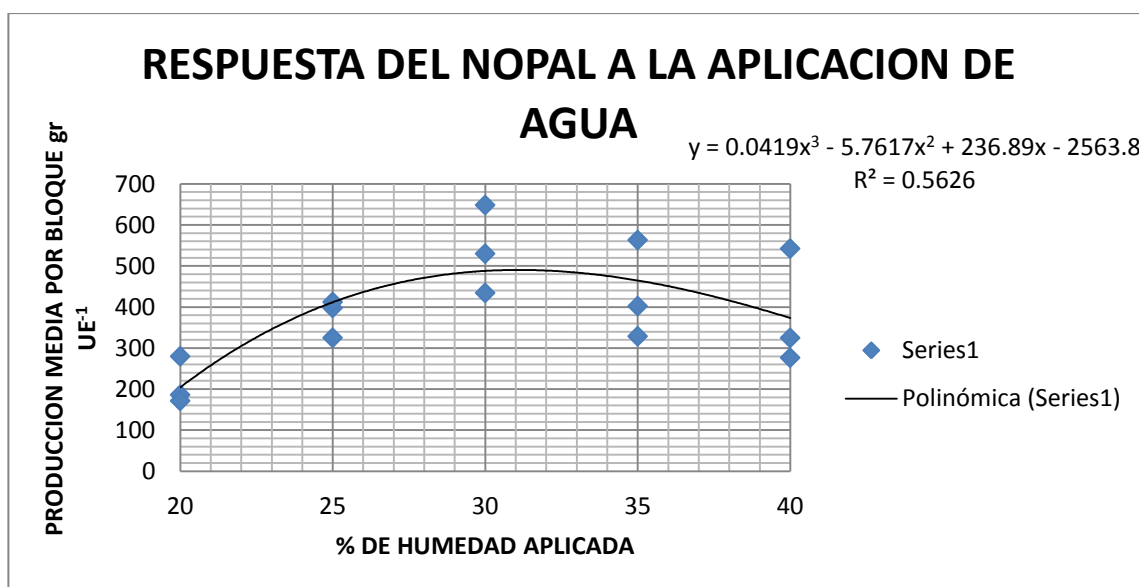


Figura 29 Gráfica de la producción media por bloque en función del % de humedad aplicado.

En la función de respuesta del nopal en función de la dosis de fertilización nitrogenada figura 30, se aprecia que a mayor aplicación de nitrógeno la producción es mayor por lo que es posible que el óptimo se alcance con dosis de nitrógeno mayores a las aplicadas en este trabajo de investigación. Si se optimiza la función cúbica que se presenta en la figura se encuentra que el máximo se obtiene con una aplicación de 258 kg de N ha⁻¹.

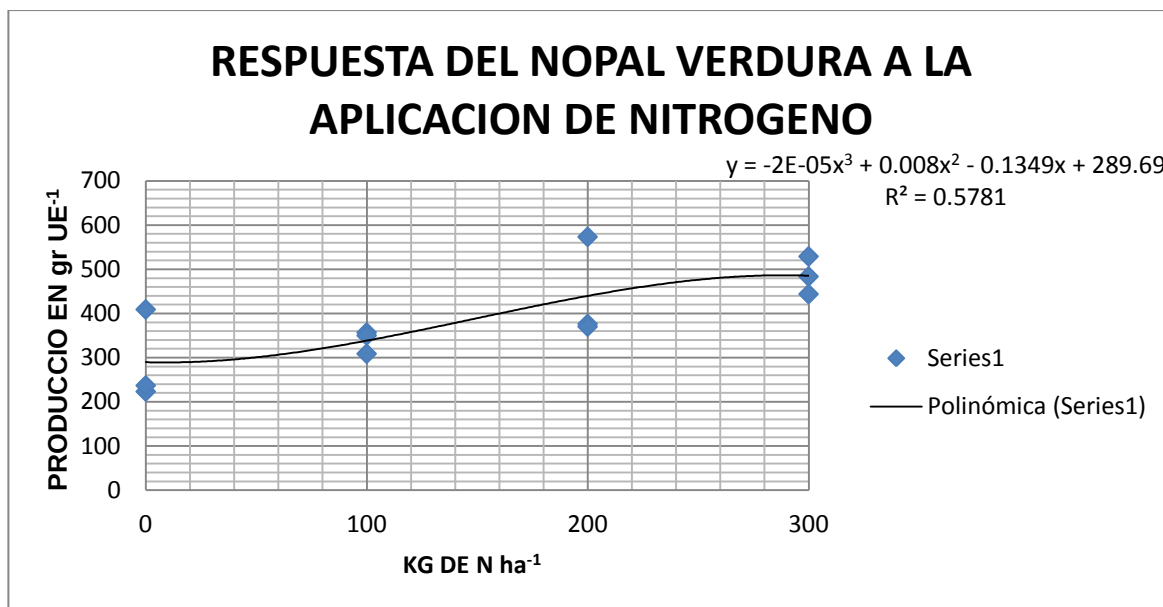


Figura 30 Gráfica de la producción media por bloque en función de la cantidad de nitrógeno aplicada

Del análisis del censo de la humedad del suelo se encontró que si se quiere determinar la humedad promedio que está disponible para la planta en la capa de suelo que comprende los primeros 5 cm para un tipo de suelo como el que se menciona en este trabajo, se deberá hacer una determinación a 10 cm del emisor.

En la gráfica correspondiente al mes de agosto presentada en el anexo 2, se puede ver el efecto que tiene en la temperatura interior el hecho de cerrar los microtúneles, dicho aumento de temperatura incrementa el promedio diario en 5.62 °C al interior. Lo anterior permite que el nopal verdura continúe la producción de brotes fuera de temporada.

6 CONCLUSIONES

El nopal verdura responde a la ley de los rendimientos decrecientes cuyo máximo para el caso de la humedad se encuentra cercano al 30% y para el caso de la fertilización nitrogenada no fue posible establecer la región del máximo pues para las dosis aplicadas en este trabajo la producción mantuvo un comportamiento ascendente.

Se concluye que el nopal verdura responde a la aplicación de fertilizante nitrogenado, de las dosis ensayadas la que ofreció la mayor producción fue cuando se aplica 300 kg de N ha⁻¹, esta producción es estadísticamente igual a la obtenida con la aplicación de 100 y 200 kg de N ha⁻¹, por lo que una dosis de 100 kg de N por ha es factible de aplicarse y obtener con buenas condiciones de manejo producciones de hasta 210 t ha⁻¹ de nopalito tierno.

Los mejores resultados de producción se obtuvieron cuando se aplicó una lámina de riego equivalente al 30% de la evaporación, siendo estadísticamente igual que si se aplica el 25 %.

En el cultivo del nopal verdura bajo cubierta se requiere al menos 5% menos agua, calculada en relación a la evaporación del lugar para producir las mismas cantidades de nopalitos.

El calor que se retiene en el interior de los microtúneles es un estimulante para la producción de nopalitos tiernos por la planta y se alarga la temporada de producción.

RECOMENDACIONES

Para investigar la cantidad de fertilizante nitrogenado necesario para obtener el máximo fisiológico del nopal verdura para la región de Chapingo, es necesario ensayar aplicaciones de nitrógeno que comprendan valores mayores a 300 kg de N ha⁻¹.

La cosecha y cuantificación de los nopalitos que alcanzan la madurez comercial deberá de hacerse a diario ó cada tercer día durante el periodo de tiempo en el cual se va a evaluar la producción, para evitar la variabilidad en el tamaño de los nopalitos.

El estudio de los requerimientos hídricos del nopal plantado en el suelo y bajo microtúnel es recomendable hacerlo en la época en la cual las lluvias no sean un factor de variación.

LITERATURA CITADA

Aguilera, C. M. y R. Martínez E. 1990. Relación Agua Suelo Planta Atmósfera. Tercera edición. Departamento de Irrigación. UACH. 321p.

Almaguer-Sierra P., Rodríguez-Fuentes H, R. D Valdez-Cepeda, J.A. Vidales-Contreras, L Barrientos-Lozano; J. Aranda-Ruiz y J Nava-González. 2007. Producción intensiva de nopal verdura en un sistema hidropónico cerrado. Revista de Difusión y Divulgación Científica TecnoIntelecto vol 5. No. 2. P 9-14.

Arévalo, G., M. Castellano. 2009. Manual de fertilizantes y enmiendas. Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central. Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano, Honduras. 57p.

Becerra P. M., J. Sainz S. y C. Muñoz P. 2006. Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. Gestión y política pública, 15(1), 111-143.

Blanco M. F., R.D. Valdez S., R. Magallanes Q., R.E Vázquez A., E. Olivares S., E. Gutiérrez O. y J. A. Vidales C. 2011. El Rendimiento e interacciones nutrimentales en nopal (*opuntia ficus indica* L.). IX Symposium-Taller Nacional y II Internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre.

Escobedo, N. L. Edición Especial No. 5-2011. Pp 255-260.

Bravo, 1978. Las cactáceas de México. Segunda edición. Volumen I. UNAM. 745p.

Brom R, F. 1970. El nopal. Comisión Nacional de Fruticultura. SAG.

Candelario M, J., S. de J. Méndez G, y G. Oropeza O. 2014. El cultivo de opuntia para la producción de forraje: de la reforestación al cultivo hidropónico. FAO Consultado en línea. (www.fao.org/docrep/007/y2808s/y2808s0f.htm). 17p.

CONAZA. 1994. Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto nacional de ecología (primera edición). Saltillo, Coahuila. México. 18p

Consejo consuntivo de agua A.C., 2013. <http://www.aguas.org.mx/sitio/02a.html>. Consulta en línea.

Corrales G. J., C. B. Peña V., Y. Razo M. & M. Sánchez H. 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). Postharvest biology and technology, 32(2), 169-174.

Esquivel, G. E. R; R. Noriega C; M. A. Bello G; A. Saavedra M. y R. Salgado G. 2012. Plantas utilizadas en la medicina tradicional mexicana con propiedades antidiabéticas y antihipertensivas. Revista de la DES ciencias biológico agropecuarias. 14(1). 45-52.

Fernández, M. R., J. Ordieres, M., F. J. Martínez de Pison, A., A. González, M., F. Alba E, R. Lostado, L., A. V Pernia, E. 2009. Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica. 2009. Universidad la Rioja. Servicio de Publicaciones. España. P.95.

Flores H, A. 1994. El nopal opuntia spp en la región árida lagunera. UACH. URUZA. Folleto de divulgación (PRONASOL-CONACYT-PLAN NUEVA LAGUNA). Chapingo, México.

Flores, V. C. A., J. M. de Luna E., P. P. Ramírez M. 1995. Mercado mundial del nopalito. ASERCA. UACH. CUESTAAM. Chapingo, México. Pp 115.

Flores H. A., I. Orona C., J. M. Martínez M., M. Rivera G. y J. G. Hernández M. 2004. Productividad del Nopal Verdura (opuntia spp) Bajo Riego Por Goteo en la Comarca Lagunera. URUZA-UACH. CENID-RASPA-INIFAP. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. Durango, México. 99-104.

Flores V, C. 2001 Producción, industrialización y comercialización de nopalitos. Reporte de investigación 58. CUESTAAM. UACH. 28p.

Flores V, C. A .2002. El Nopal y la lucha contra la desertificación. Reporte de investigación 59. CUESTAAM. UACH. 39p.

Flores V, C. A. G. Aranda O., y P. Ponce J. 2007. Uso del nopal en la

reforestación y conservación de suelos. Revista salud pública y nutrición.VI Simposium taller producción y aprovechamiento del nopal en el noreste de México. 7 y 8 de diciembre. CIESTAAM. UACH. Chapingo, México. 37-90.

García, L. C; B. E. Pérez H; A. Martínez R. y F. Castro B. 2009. Uso de plantas medicinales y suplementos dietéticos para el control glucémico de la diabetes. Revista Chapingo serie zonas áridas. Chapingo, México. 229-239.

Guevara, J. C., M. Yahia, E.; M. Beaudry, R., & Cedeño, L. 2006. Modeling the influence of temperature and relative humidity on respiration rate of prickly pear cactus cladodes. *Postharvest biology and technology*, 41(3), 260-265.

Gutiérrez O. D. E., A. Elías, H. Bernal y H. Morales. 2007. Usos alternativos del nopal forrajero. VI Simposium taller producción y aprovechamiento del nopal en el noreste de México. 7 y 8 de diciembre. Marín, N. L. México. 4 p.

Hernández P, J. L. M. 2009. Desarrollo de un sistema electrónico para la medición de temperatura. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 90 pp.

INIFAP, 2008. Nopal para forraje en el altiplano potosino. Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias. Centro de investigación regional del noreste. Campo experimental San Luis. SAGARPA. Folleto para productores 49. 31p.

Kuehl, R. O. 2001. Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigaciones. Segunda edición. Universidad de Arizona. 680p.

López D., A. C. 2003. Efectos de la fecha de riego y estimuladores de la brotación en nopal tunero. Tesis profesional. UACH. 70p.

López, L. R. 2008. Necesidades hídricas e índices de estrés hídrico en tomate de cascara (*Physalis ixocarpa Brot*). Tesis de doctor en ingeniería. UACH. Chapingo, México. Pp 135.

Luna, V. J. 2011. Producción invernal de nopal verdura. INIFAP. Centro de investigación regional noreste. San Luis Potosí. Folleto para productores No. 52. Pp 34.

Martínez, E. R. 1991. Riego localizado. Diseño y evaluación. Patronato universitario. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de irrigación. Edición 1, Chapingo, Estado de México. 161 p.

Martínez, G. A. 2005. Experimentación Agrícola Métodos Estadísticos. Primera Reimpresión. Chapingo, Estado de México. Pp 358.

Mendoza, A. G. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, (087).

Mestrallet, M. G., Nepote, V., Quiroga, P. R., & Grosso, N. R. 2009. Effect of prickly pear (*opuntia ficus- indica*) and algarrobo (*prosopis spp.*) pod syrup

coatings on the sensory and chemical stability in roasted peanut products. *Journal of food quality*, 32(3), 334-351.

Montgomery. 2013. Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición. Limusa Wiley. Mexico. Pp 686.

Noriega, A. S. 1986. Aspectos metodológicos en experimentos de respuesta de los cultivos a la humedad del suelo. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. UACH. Chapingo, México. 159pp

Orona C, I., A. Flores H., M. Rivera G., J. G. Martínez, J. J. Espinosa A. 2003. Productividad del agua en el cultivo del nopal con riego por goteo en la comarca lagunera. *Terra latinoamericana*, vol. 21. Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo a.c. Chapingo, México: 195-201.

Orona C. I; J.A. Cueto W., B. Murillo A., J. Santamaría C., A. Flores H., R. D. Valdez C., J. L. García H. y E. Troyo D. 2004. Mineral extraction of green prickly pear cactus under drip irrigation. *J. PACD*. 90-101.

Orsohe R. A., E. Figueroa H., L. E. Espinosa T. y M. A. Ortiz, R. 2012. Producción de nopal verdura en condiciones de invernadero. *Sexta Época*. Año XVI. Volumen 31. Julio-diciembre del 2012. 98-110.

Orúe G, R. J., Rojas S, E. J., Blanco N, M. A., & Chavarría G, I. A. (2008). Efecto de enmiendas nutricionales sobre el rendimiento del nopal (*Opuntia ficus*

indica L.) en Diriamba. Tesis profesional. Carazo, 2008.

Palacios, E., F. Remiro y L. J. López 2014. Microcontrolador Pic16f84
Desarrollo de proyectos. Alfaomega-Ra-MA. México, DF. 619p.

Puente, A. T. 2008. Nuevos productos y subproductos a base de nopal
(alimenticios y medicinales) una alternativa de producción sustentable para las
zonas rurales de México. VII Symposium-Taller “Producción y Aprovechamiento
del Nopal en el Noreste de México. 24 y 25 de octubre. Mina, N. L. México.

Pulido Acuña R y García Pérez Y. (2012) [http://e-
local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15099a.html](http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15099a.html)
consulta en línea. H Ayuntamiento de Texcoco.

Ramírez A, H.T. 2012. Estrategia de un nuevo producto: Estudio de un MYPE.
Administración y organizaciones.

Reveles H, M., M. Á. Flores O., F. Blanco M., R. D. Valdez C., y G. Félix R.
2009. El manejo del nopal forrajero en la producción del ganado bovino. VIII
Symposium- Taller Nacional y 1er. Internacional de “Producción y
Aprovechamiento del Nopal. 13-14.

Ríos, R. J., y V. Quintana M., (2004). Manejo general del cultivo de
nopál. Secretaria de la Reforma Agraria. Colegio de postgraduados,
montecillos, México.

Robles M.; A. 1999. Evaluación de cultivares de nopal verdulero, bajo condiciones de microtúnel en ojocaliente, Zacatecas. *In: Memoria del VIII Congreso Nacional y VI Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México. Pp 94-95.

Robles C. F., R. Macías D., y R. L. Grijalva C. 2008. Tecnología de producción de nopal verdura para el noroeste de Sonora. Centro de Investigación de Noroeste. Campo experimental costa de Hermosillo. Sitio experimental Caborca. SAGARPA-INIFAP-FUNDACION PRODUCE SONORA A.C. 35p.

Sáenz, C; Sepúlveda E; Matsuhira B. 2003. Opuntia spp Mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of arid environment* 57 (2004) 275–290. P 275-290.

Sáenz, C., & Berger, H. 2006. Utilización agroindustrial del nopal (Vol. 162). Food & Agriculture Org.

Salazar S, E., M. Ortiz H., A. Vázquez A. y C. Vázquez V. 2003. Agricultura Orgánica. Sociedad Mexicana de la Ciencia Del Suelo. Facultad de agricultura y zootecnia de la UJED. 246: 37-49.

Saucedo, T. M del S y N. Bañuelos F. 2014. Productos alternativos para tratar

sobrepeso y obesidad mas expendidos en Hermosillo Sonora. Revista ciencias biológicas de la salud. XVI(2). 8-14.

Valdez C. R. D., F. Blanco M., B. Murillo A., J. L. García H., R. R. Ruiz G., M. Márquez M., J. D. López M., J. C. Ledesma M. y F. J. Macías R. 2003 Fertilización y nutrición en tres variedades de nopal (opuntia ficus indica). Sistemas de producción agropecuaria- Agrofaz Volumen 3 Numero 2. P 347-351.

Valdez C. R. D., F. Blanco M., R. Magallanes Q., R. E. Vázquez A. y M. Reveles H. 2009. Avances en la Nutrición del Nopal en México. Memorias del VIII Simposium-Taller Nacional y 1º Internacional “Producción y Aprovechamiento del Nopal”. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 1-13.

Vázquez A, R. E; F. Blanco M., del C. Ojeda Z., J. R. Martínez L., R. D. Valdez C., A. Santos H. y L. A. Háuad M. 2008. Reforestación a base de nopal y maguey para la conservación de suelo y agua. IX simposium taller Nacional y II internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre. Escobedo, N. L. Mexico. 185-203.

Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D. & de Santa Rita, C. P. P. 2009. Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the*

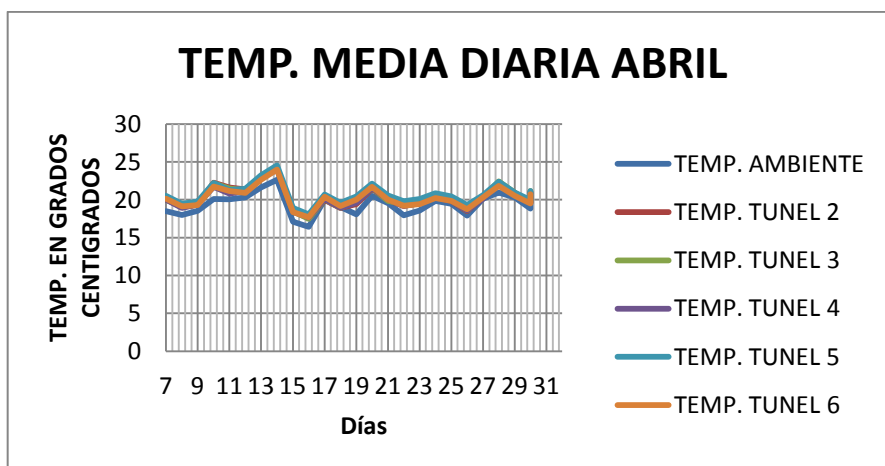
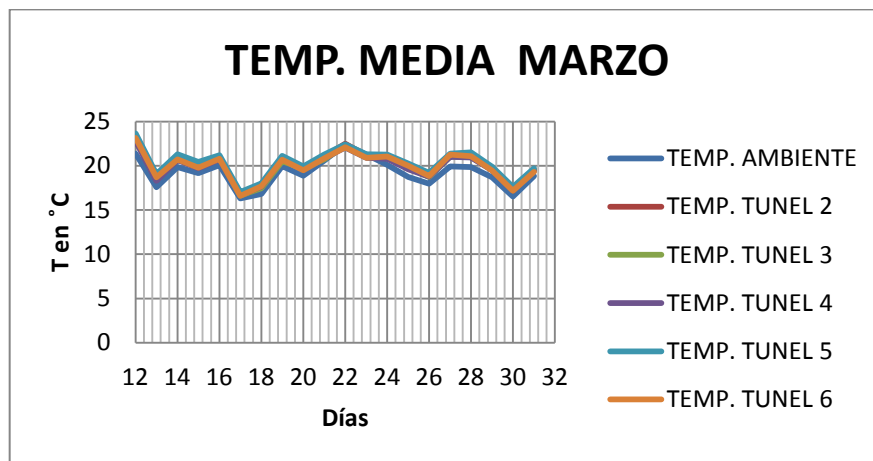
Professional Association for Cactus Development, 11, 53-68.

Zegbe J.A.; Mena Covarrubias, J. 2004. Retraso de la cosecha en nopal tunero cv. Cristalina. INIFAP campo experimental zacatecas. México.

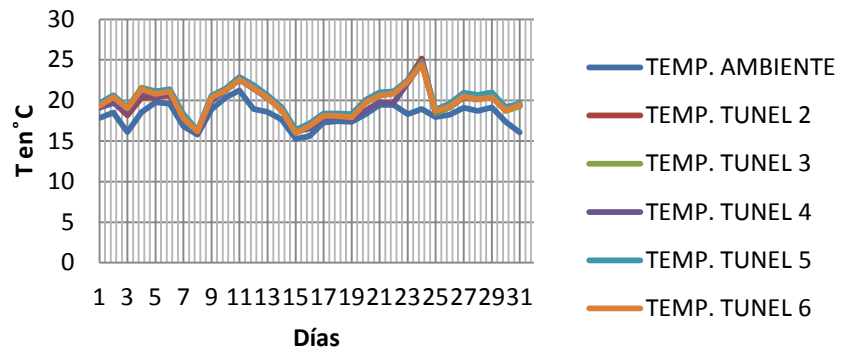
ANEXOS

Anexo 1 Gráficas de la temperatura media diaria y la humedad relativa media diaria observadas en los meses en los que se llevó a cabo el experimento.

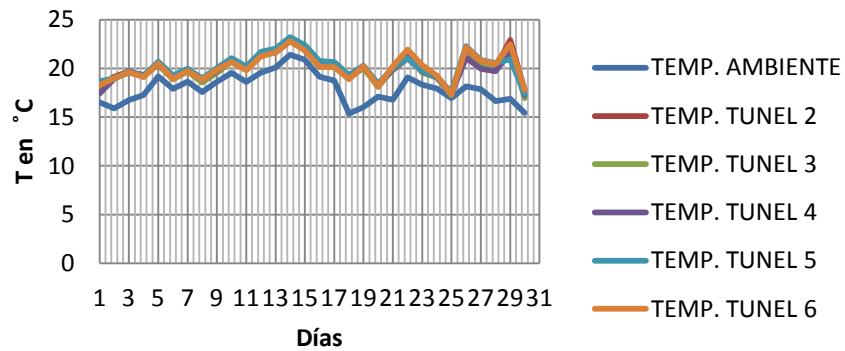
a) Gráficas de Temperatura.



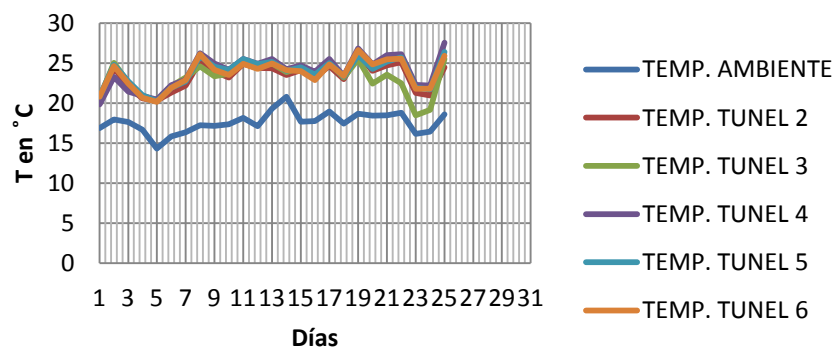
TEMP. DIARIA MAYO



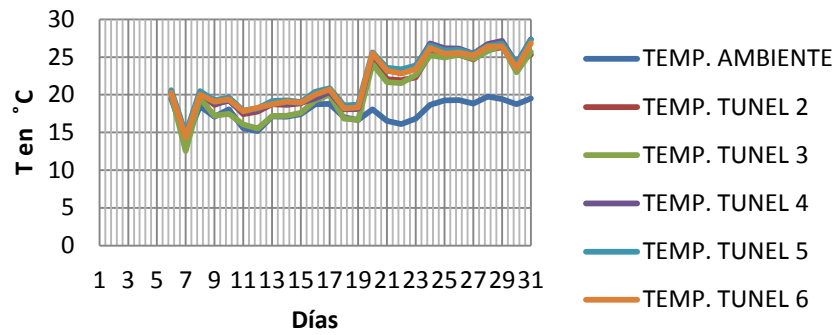
TEMP. MEDIA JUNIO



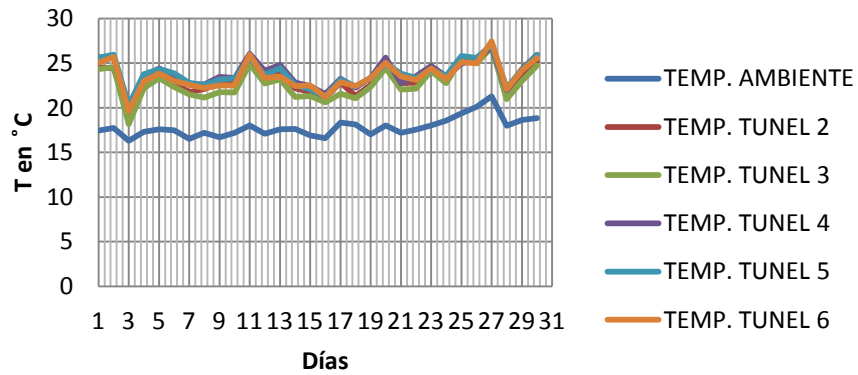
TEMP. MEDIA JULIO



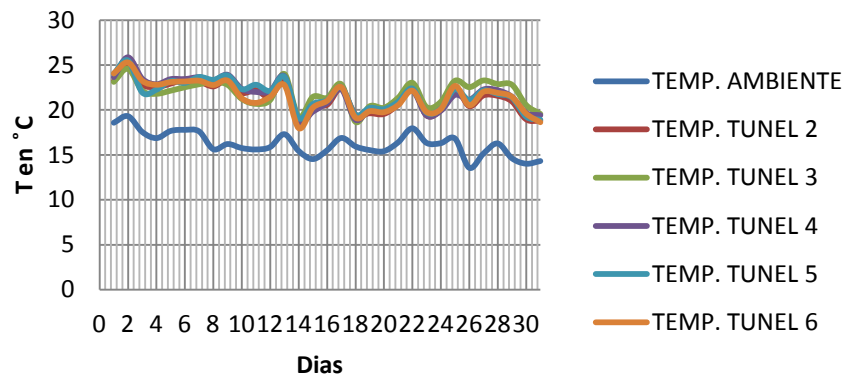
TEMP. MEDIA AGOSTO



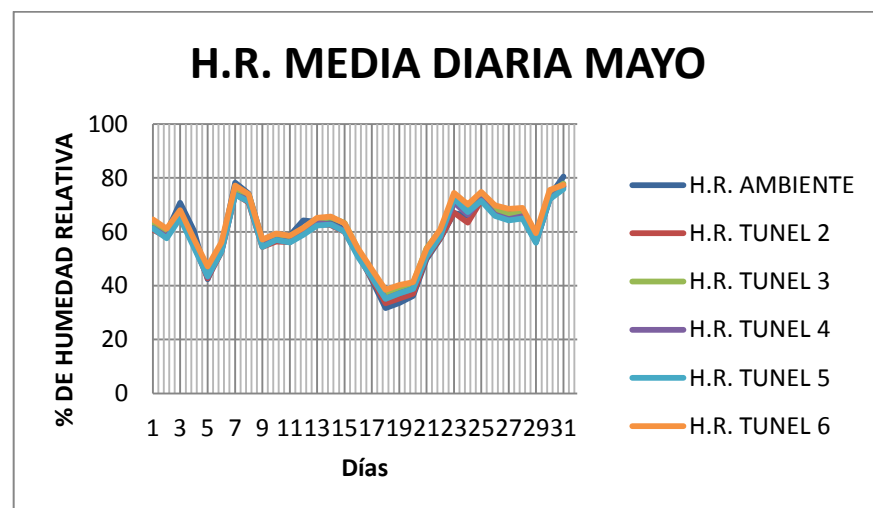
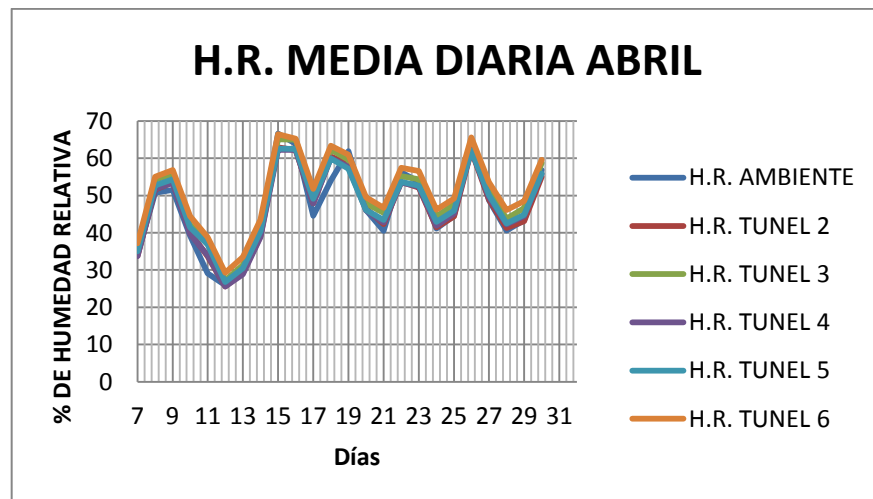
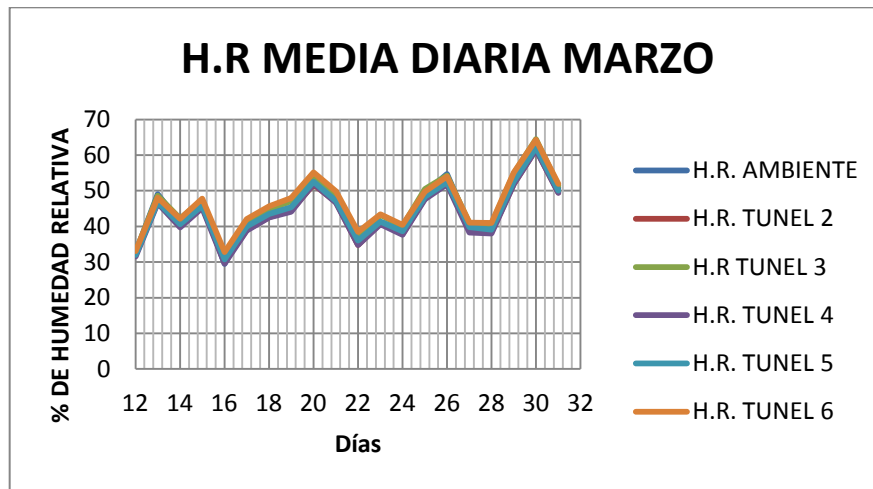
TEMP. MEDIA SEPTIEMBRE



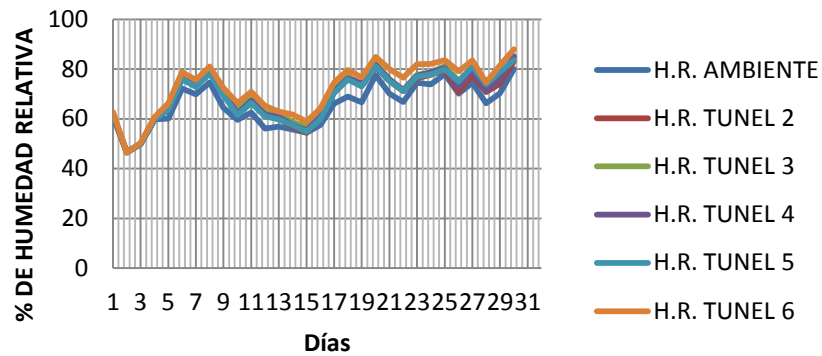
TEMP. MEDIA OCTUBRE



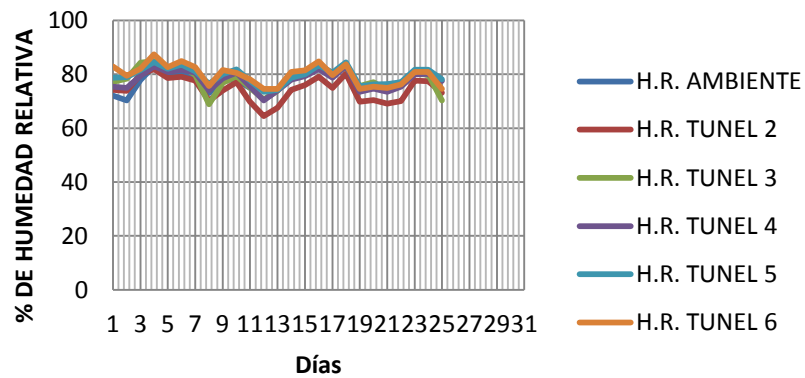
b) Gráficas de Humedad Relativa



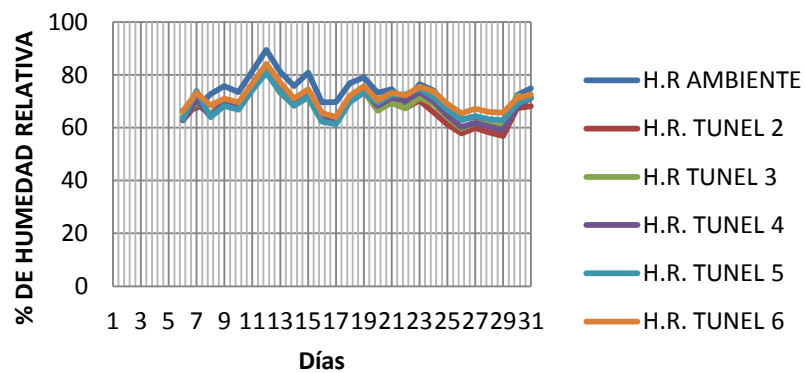
H.R. MEDIA DIARIA JUNIO



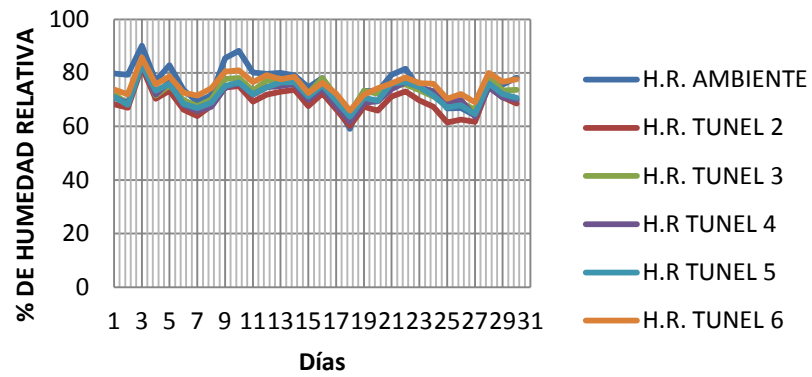
H.R MEDIA DIARIA JULIO



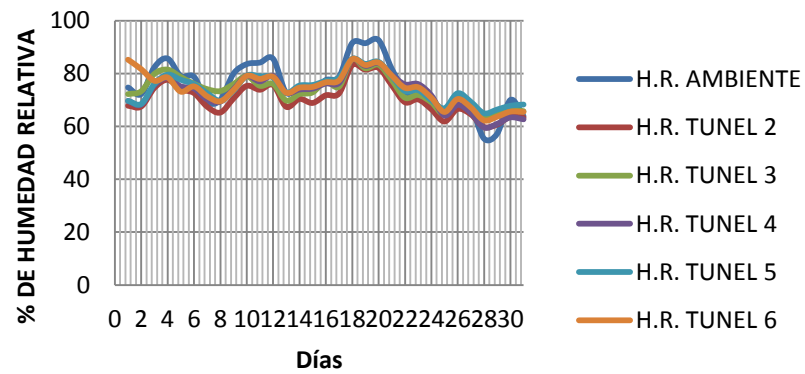
H.R. MEDIA DIARIA AGOSTO



H.R. MEDIA DIARIA SEPTIEMBRE

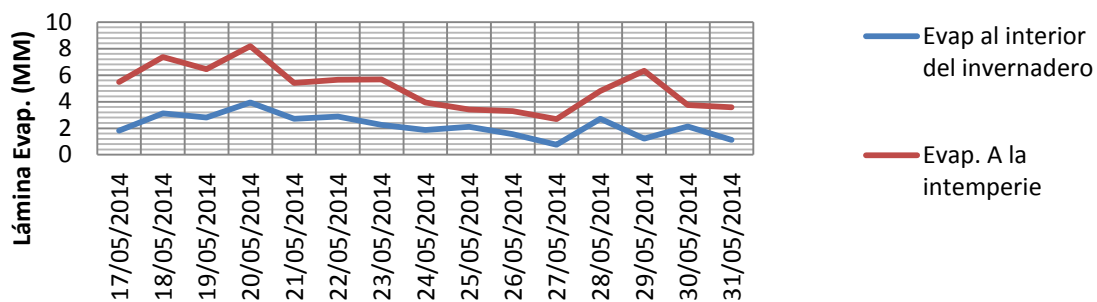


H.R. MEDIA DIARIA OCTUBRE

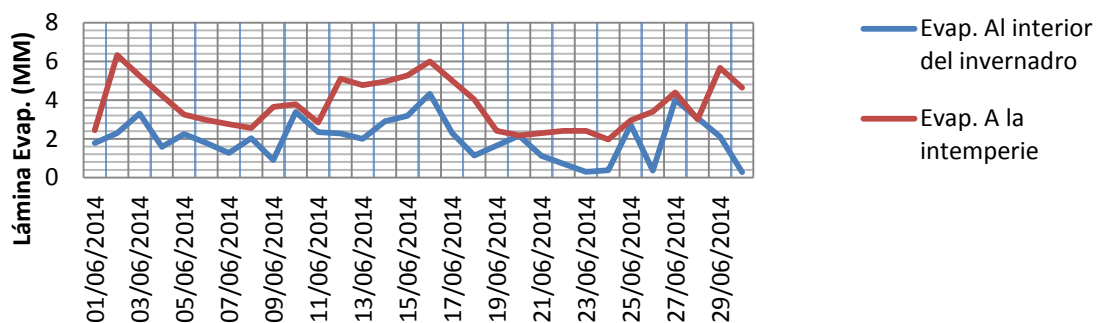


Anexo 2 Gráficas de la evaporación al interior del invernadero y a la intemperie para los meses en los que se observó el experimento.

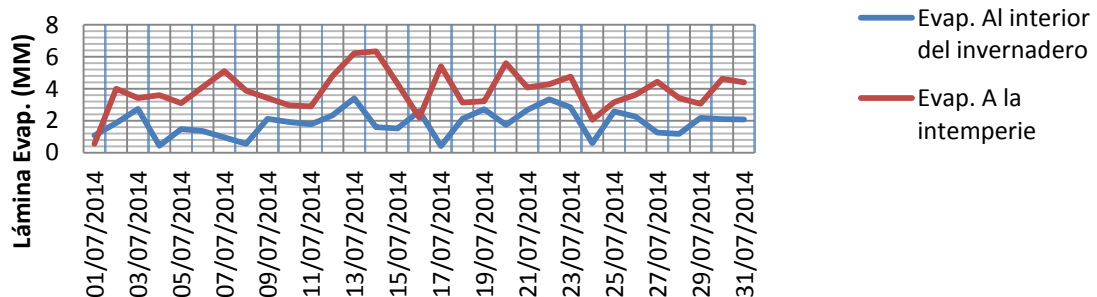
EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE MAYO



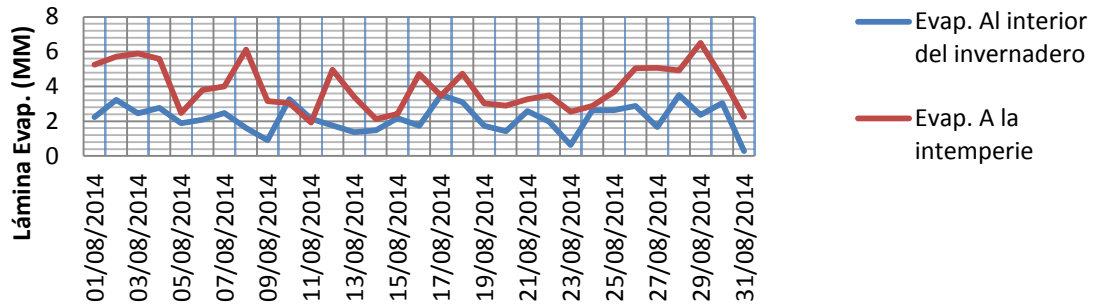
EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE JUNIO



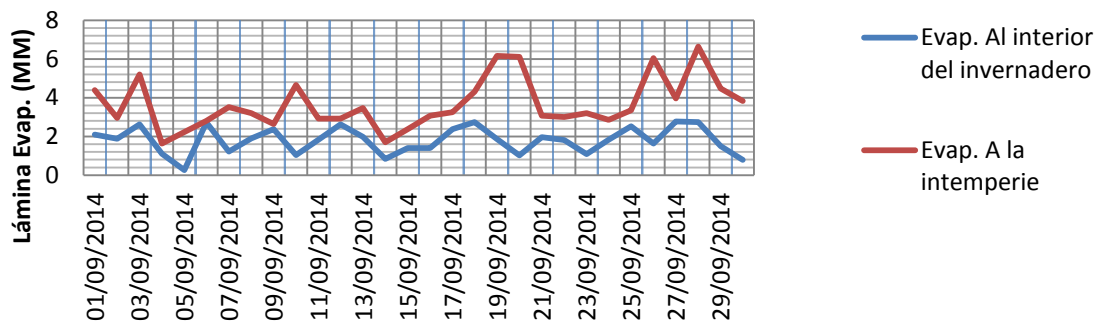
EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE JULIO



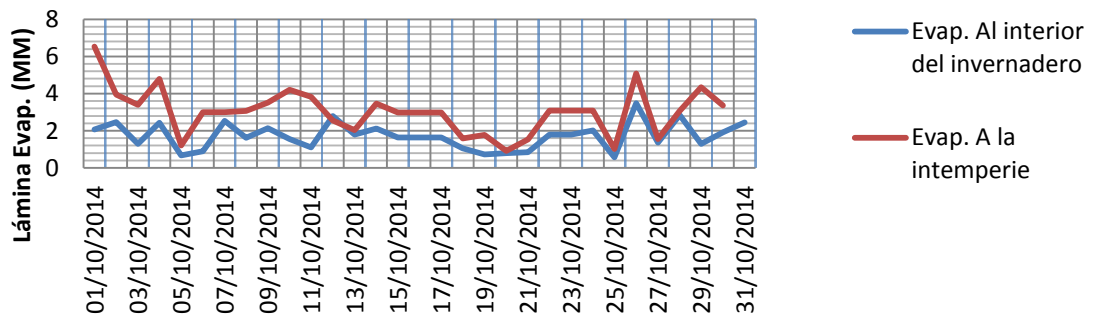
EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE AGOSTO



EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE SEPTIEMBRE



EVAPORACION DIARIA MEDIDA EN MM MES DE OCTUBRE



Anexo 3 Mapas de la humedad del suelo en los microtúneles y su evolución durante 15 días en los cuales se le aplico riego cada tercer día.

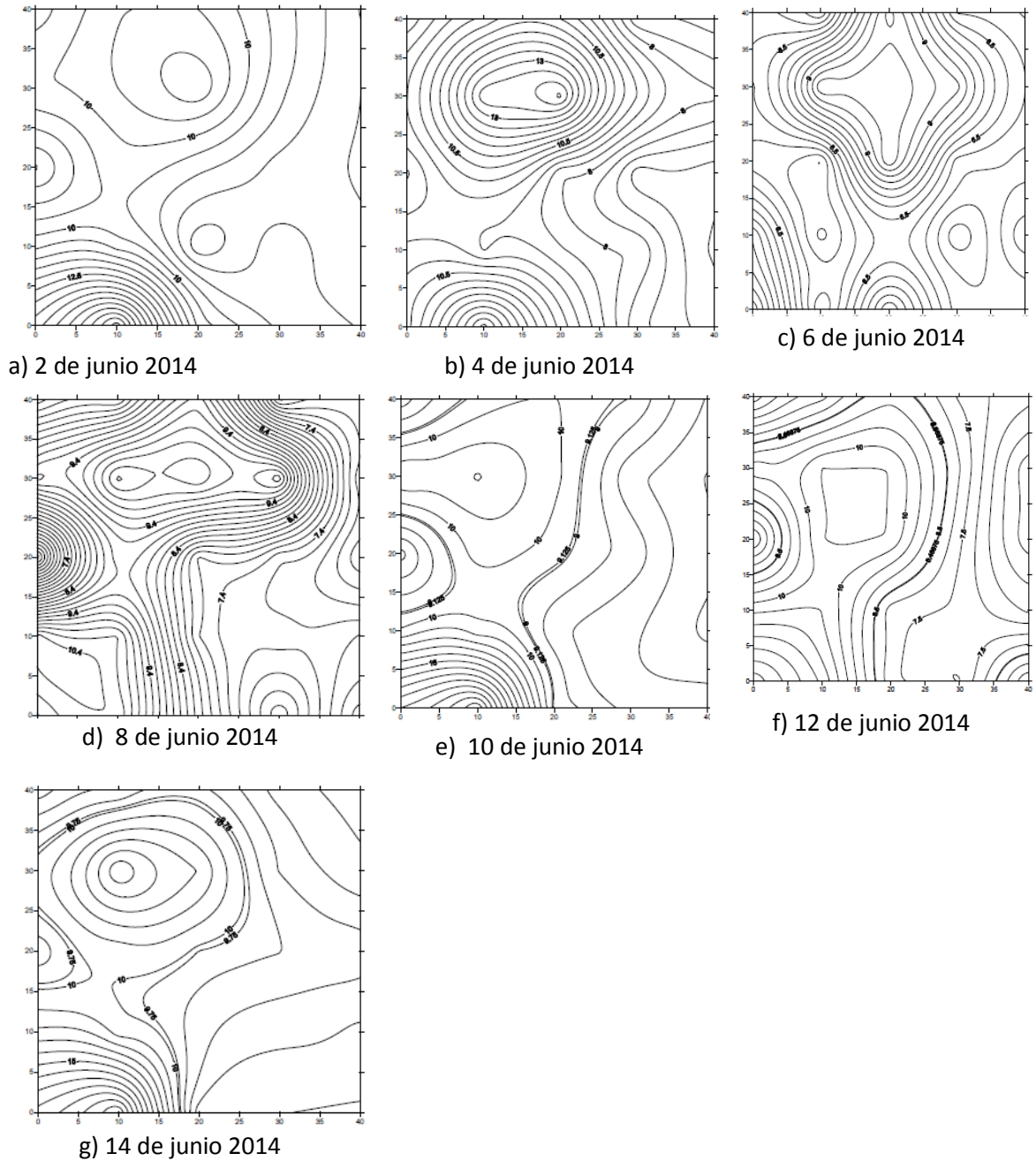


Figura 1 20% de humedad del suelo.

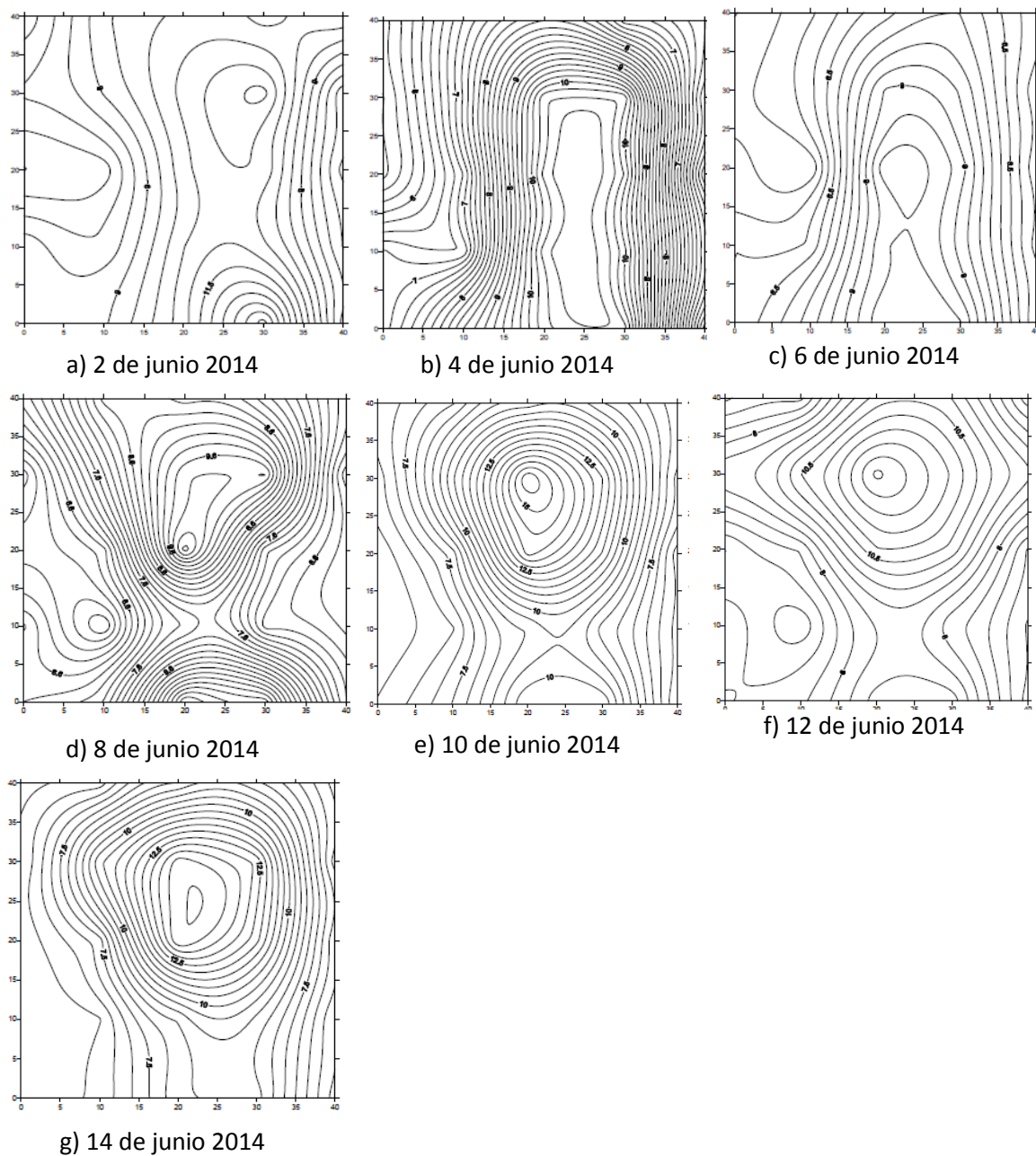
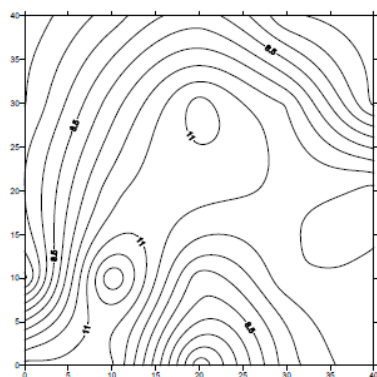
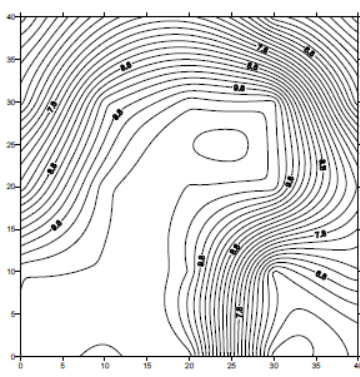


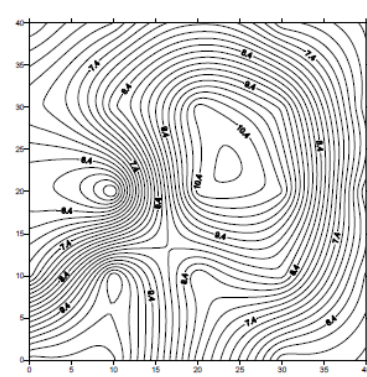
Figura 2 40% de humedad del suelo



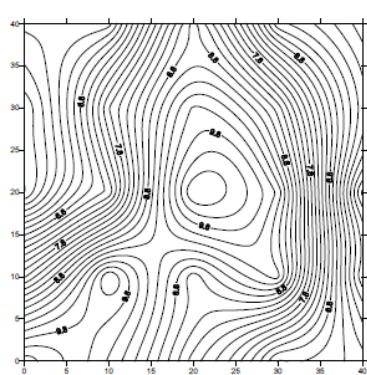
a) 2 de junio 2014



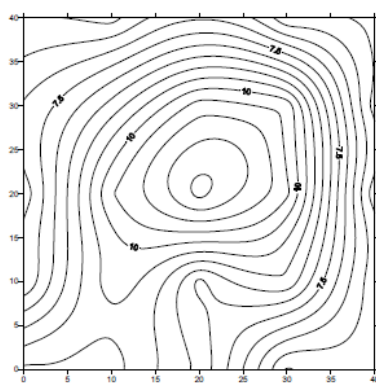
b) 4 de junio 2014



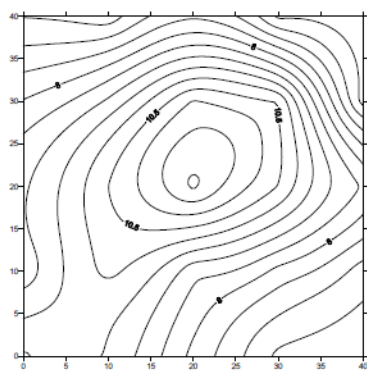
c) 6 de junio 2014



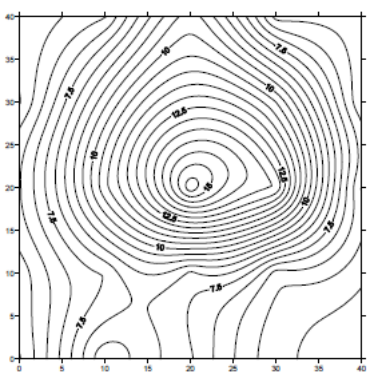
d) 8 de junio 2014



e) 10 de junio 2014



f) 12 de junio 2014



g) 14 de junio 2014

Figura 3 25 % de humedad del suelo.

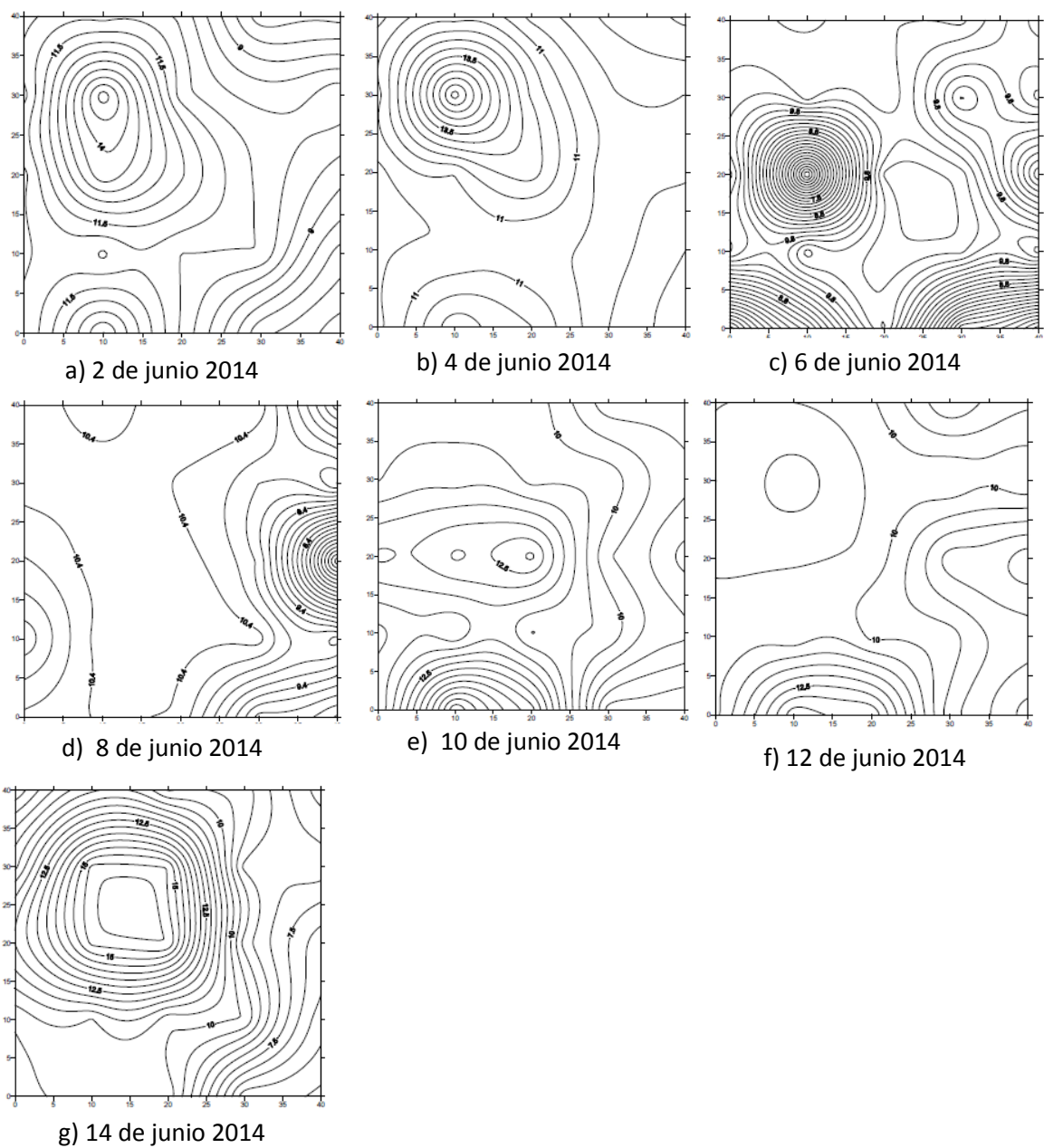
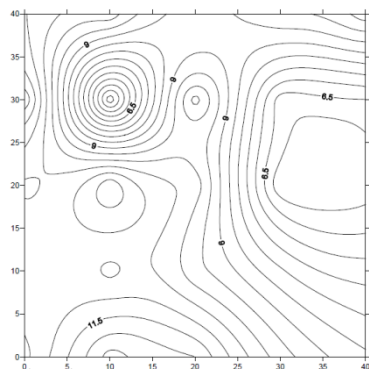
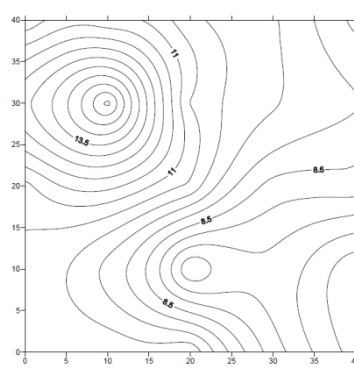


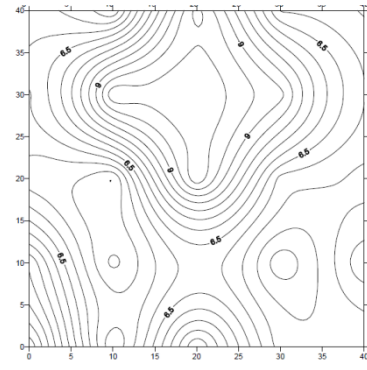
Figura 4 30 % de humedad del suelo.



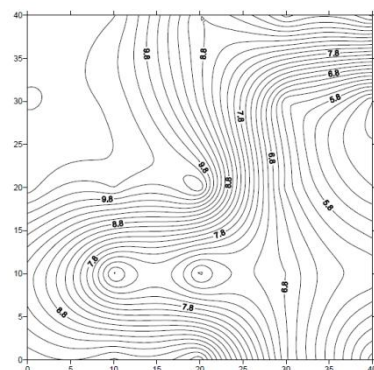
a) 2 de junio 2014



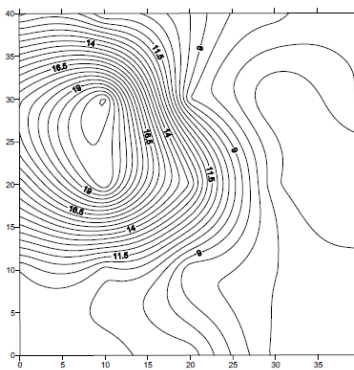
b) 4 de junio 2014



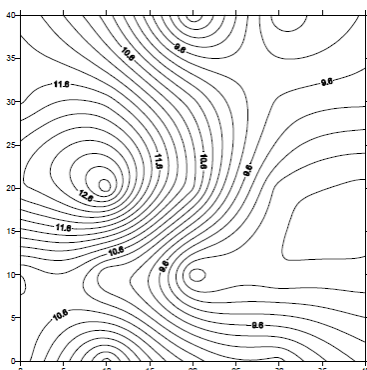
c) 6 de junio 2014



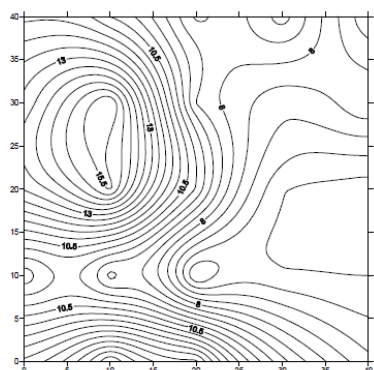
d) 8 de junio 2014



e) 10 de junio 2014



f) 12 de junio 2014



g) 14 de junio 2014

Figura5 35 % de humedad del suelo.