



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

---



**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA  
MONITOREAR Y REGISTRAR VARIABLES AGROCLIMÁTICAS EN INVERNADERO**

**TESIS:**

Para obtener el grado de:

**Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica**

**PRESENTA**

GUADALUPE SARAI MÉNDEZ MELO

**MATRÍCULA:** 201419843

**ASESORES DE TESIS**

**Dr. MARIO ALBERTO TORNERO CAMPANTE**

**Dra. LAURA ALICIA PANIAGUA SOLAR**

**PUEBLA, PUE. A 05 DE JULIO DEL 2022**



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

Tesis:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA  
MONITOREAR Y REGISTRAR VARIABLES AGROCLIMÁTICAS EN INVERNADERO

TESIS:

Para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica

PRESENTA

GUADALUPE SARAI MÉNDEZ MELO

MATRÍCULA: 201419843

Vo. Bo. ASESORES DE TESIS

  
DR. MARIO ALBERTO TORNERO CAMPANTE

  
DRA. LAURA ALICIA PANIAGUA SOLAR

PUEBLA, PUE. A 05 DE JULIO DEL 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios**

Por darme la vida, por estar conmigo a lo largo de mi carrera, por ser una luz en mi camino y darme sabiduría y fuerza para alcanzar mis metas.

### **A mi hija**

Porque sin tu ayuda, no habría logrado desarrollar mi trabajo de tesis, eres el motor de mi vida.

### **A mis Padres**

Porque a pesar de las dificultades que trae la vida, siempre me han enseñado a seguir adelante y no rendirme. Sin su apoyo incondicional en todos los ámbitos, no estaría donde estoy hoy.

### **A mis Asesores de Tesis**

#### **Dr. Mario Alberto Tornero Campante**

Quisiera agradecer especialmente al Dr. Mario Alberto Tornero Campante, quien me brindó la confianza para llevar a cabo este proyecto, por su entrega incondicional a lo largo del desarrollo de este trabajo, por ser tan paciente y explicarme todos esos detalles que no comprendía mientras terminaba mi tesis, y ser uno de las personas que me animaban para poder concluir esta etapa de mi vida. De verdad Dr. Tornero, gracias por enseñarme todo lo que sé y más que eso, por guiarme para ser una mejor persona y profesional.

#### **Dra. Laura Alicia Paniagua Solar**

Gracias a la Dra. Laura Alicia Paniagua Solar, por permitirme ser partícipe de uno de sus proyectos dentro de la Universidad, por su entrega incondicional durante el desarrollo de este trabajo de investigación, por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda que me surgiera, le agradezco por la claridad y exactitud con la que me enseñó en cada asesoría.

### **A mis hermanos**

Gracias por apoyarme en todo momento, por estar ahí durante todo el trayecto de mi carrera cuidando a yare mientras yo me iba a la Universidad para poder concluir esta meta. No solo por estar presentes aportando cosas buenas en mi vida, sino por los grandes momentos de felicidad y de diversas emociones que me han causado.

# Índice General

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	7
1.1 Planteamiento de Problema.....	9
1.2 Justificación .....	10
1.3 Objetivos e Hipótesis .....	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.1.1. Objetivos específicos.....	11
1.3.2. Hipótesis General.....	11
1.3.2.1 Hipótesis Específicas.....	11
<b>II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	13
2.1 La mecatrónica en la agricultura .....	13
2.1.1. Tecnología aplicada en invernaderos .....	14
2.1.2. Agricultura Tecnificada .....	14
2.2. Sistemas y automatización de invernaderos.....	15
2.3. Antecedentes de la Agricultura.....	17
2.4 Factores que afectan a los invernaderos.....	19
2.5. Hidroponia en invernaderos .....	20
2.6. Cultivo de pepino en hidroponia.....	20
2.7. Requerimientos del cultivo del pepino.....	21
2.7.1. Exigencias del cultivo de pepino en temperatura.....	21
2.7.2 Exigencias del pepino en humedad relativa[29]. .....	21
2.7.4. Exigencias de radiación fotosintética activa o intensidad luminosa (PAR) .....	23
2.7.5 Exigencias de concentración de CO <sub>2</sub> .....	23
<b>III.- METODOLOGÍA</b> .....	25
3.1 Diseño del sistema de monitoreo y obtención de datos.....	25
3.2 Elección de Componentes .....	26
3.3 Montaje del circuito .....	27
3.4 Fase de programación.....	32
3.5 Obtención de las variables fenológicas del cultivo.....	36
<b>IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	39
4.2 Temperatura .....	39
4.3 Humedad relativa.....	42
4.4 Intensidad luminosa .....	44

4.5	Humedad del sustrato.....	45
4.6	Dióxido de carbono CO <sub>2</sub> .....	46
4.7	Seguimiento a variables fenológicas.....	48
4.7.1	Altura de planta.....	48
4.7.2	Diámetro de tallo.....	50
4.7.3	Número de hojas .....	51
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>VI.-</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>62</b>
A.	Raspberry pi 3b+ características .....	62
B.	Pantalla 3.5 pulgadas LCD para Raspberry.....	64
C.	Arduino.....	65
D.	DHT22 (sensor de temperatura y humedad relativa) .....	65
E.	Sensor de humedad de suelo.....	67
F.	Sensor de intensidad luminosa .....	68
G.	Sensor de CO <sub>2</sub> .....	70
<b>VI.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>71</b>

## Resumen

La desconfianza que se genera hoy en día con relación a la demanda de alimentos, la cual es ocasionada principalmente por el cambio climático debido a que genera inseguridad en los cultivos que son de temporal, por lo que el hombre buscó una alternativa para producir con mayor seguridad y volumen en invernaderos. El presente trabajo de investigación busca contribuir a solucionar un problema relacionado sobre la toma de decisiones en cuanto a las variables agroclimáticas para la producción de invernaderos.

Para lograrlo, se propuso el desarrollo de un sistema electrónico de monitoreo para el seguimiento, registro, almacenamiento y exportación de variables agroclimáticas en un invernadero sembrado con pepino criollo. Para ello, se utilizó una placa Arduino UNO junto con los sensores específicos para la obtención de dichas variables y una placa Raspberry pi para su almacenamiento y exportación de la información recibida por la placa Arduino. Los resultados mostraron que una de variables con mayor impacto en las variables fenológicas del cultivo fue la temperatura, debido a las altas temperaturas que se había dentro del invernadero, ocasionando estrés sobre la planta, así pues, afectando al polen generando directamente falla en la polinización.

Se logró demostrar que, con el equipo de bajo costo, fue posible obtener la información necesaria para comprender las variables fisiológicas que ocurrieron en el cultivo de pepino expuestas a distintas variables agroclimáticas y que se puede ser útil para los productores con tecnologías bajas y medias.

## I. INTRODUCCIÓN

La tecnología ha ido avanzando significativamente con el paso del tiempo, está modificando nuestra vida de manera vertiginosa y nuestras perspectivas para el futuro, se ha ido resaltando su importancia, en primer lugar, por la fuerte influencia que ejerce sobre la automatización y por consiguiente sobre la producción sobre las industrias y en un ámbito más general, la influencia que ha tenido en los sectores económicos, ya que es muy notoria en los casos de la banca y el comercio.

Los avances tecnológicos de los últimos años han abierto la posibilidad para cambiar la estructura rígida de los sistemas tradicionales por una estructura flexible que se apoya en las computadoras, circuitos de acondicionamiento, transmisión de datos, hardware de adquisición de datos y software[1].

La electrónica, ha cambiado la forma en la que los humanos se pueden comunicar e interactuar, en otras palabras, ha cambiado la forma en que vivimos. Dentro de la electrónica hay un apartado que ha cobrado especial importancia: la Electrónica digital, que se está imponiendo a la electrónica tradicional. Gracias a los avances en electrónica digital es posible recopilar, almacenar e intercambiar información de manera inmediata, sin importar el lugar donde se viva y en donde se haya generado esa información[2].

Uno de los avances tecnológicos más importantes en la evolución de la electrónica ha sido la automatización de los procesos industriales pues ha permitido la realización de múltiples tareas mejorando la eficacia de los sistemas de producción y aumentando la calidad de los productos finales.

El impacto de la automatización sobre las diferentes áreas circula alrededor de un fundamento: eficiencia. Los sistemas automatizados son excelentes para llevar a cabo tareas repetitivas y una vez que son calibrados, raras veces se desvían de su funcionamiento, es decir, tienen siempre resultados consistentes; una de las áreas

que hoy en día ha tenido gran impacto es la agricultura[3]. Mediante la introducción de las tecnologías aplicadas a la agricultura, los sistemas de producción han evolucionado no sólo en los resultados de sus siembras, sino hasta de la rentabilidad del negocio con mayor eficiencia.

Una de las técnicas recientes que se utilizan actualmente en la producción agrícola, es la producción de cultivos bajo invernadero. La ventaja del sistema de producir en invernadero sobre el sistema tradicional a cielo abierto, es que se establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo, y un mejor control de plagas y enfermedades. Es decir que es posible establecer cultivos fuera de temporada y en la época de invierno sin temor a que las plantas mueran debido a las bajas temperaturas, es una de las principales ventajas de un invernadero[4].

La inversión internacional en el desarrollo de soluciones que ayuden a mejorar los rendimientos de los diversos procesos agrícolas ha llegado a niveles históricos, ya que el impacto de la automatización en el sector agrícola es de suma importancia, pues la automatización de los procesos productivos se ha enfocado en reemplazar con máquinas las tareas realizadas por las personas. Sin embargo, en la actualidad los desarrolladores de estas tecnologías están yendo más allá, ya que se necesita hacer mucho más con menos recursos naturales como: agua, suelo y bosques, los cuales deberán ser explotados de manera sustentable [5].

Las empresas de éxito se diferencian por el uso o desarrollo de tecnología y la forma en que prestan sus servicios, el campo no debe ser la excepción, las empresas agrícolas deben usar la tecnología existente en el mercado, Los agros negocios están relacionados fuertemente con nuevas tecnologías, por ejemplo, la producción en invernadero, la hidroponía, la biotecnología, etc.

En la actualidad, el humano enfrenta las consecuencias de un rápido calentamiento global, originado por estilos de vida que implican el uso de tecnologías altamente contaminantes y gastos innecesarios de energía. Según el censo 2021 (ONU), hay

aproximadamente 7,875 millones de habitantes en el mundo y existe una creciente demanda en cantidad, calidad y variedad de alimentos[6], la pregunta es: ¿Quién, donde y bajo qué condiciones ambientales y de recursos naturales se va a producir lo que la población estará demandando en los próximos años? ¿Cómo estará afectando el cambio climático al campo y a la producción de alimentos?

Para resolver esta situación, será necesario incrementar la superficie de cultivos en invernaderos de bajo costo con cubiertas de plástico, ya que no hay más suelo cultivable del cual se pueda disponer, haciendo frente a situaciones determinantes como el crecimiento de los cultivos en condiciones de una mayor temperatura, intensidad luminosa, humedad relativa y un mayor requerimiento de agua que tienen que manejarse dentro de rangos óptimos[7].

Con base en lo anterior, el propósito de este trabajo de investigación es diseñar un dispositivo electrónico para el registro, almacenamiento y la exportación de las variables agroclimáticas de mayor impacto en los cultivos que se producen en invernaderos no tecnificados pero que disponen de energía eléctrica.

### 1.1 Planteamiento de Problema

La innovación en la producción agrícola en México es necesaria, debido a la alta demanda de alimentos por parte de una creciente población con cerca de 130 millones de habitantes[8]. La producción de alimentos, tiene retos que superar, entre ellos: que los alimentos se puedan producir en un menor tiempo y espacio, ocupar la menor cantidad de recursos naturales, que los procesos tecnológicos de producción se adapten a las necesidades de genotipos, clima, suelo, manejo etc., con un mayor número de frutos por planta.

La desconfianza que se genera hoy en día en México es ocasionada por el cambio climático global, ya que el 79% de los cultivos que se producen en nuestro país son de temporal, eso genera incertidumbre. No se sabe, si la época de sequía se

alargará, o si es buen tiempo para cosechar, por lo que actualmente entre los agricultores se despierta el interés y la iniciativa por desarrollar la agricultura sustentable con base en los invernaderos automatizados apoyados con las energías limpias[9].

## 1.2 Justificación

El trabajo de investigación, plantea contribuir en la solución de un problema relacionado con la falta de información de las variables agroclimáticas que permitan una óptima toma de decisiones para la producción de alimentos en invernadero. Esto mediante la conjunción de los conocimientos, técnicas e instrumentos de medición que tiene la Mecatrónica con la tecnología reciente que ha logrado alcanzar la Agricultura, para producir en condiciones controladas, obligadas por el cambio climático. El diseño de un sistema para monitorear, registrar, almacenar y proporcionar mediante TIC's, los datos de las variables agroclimáticas que afectan a los cultivos[10]. Lo anterior permite al productor la toma de mejores decisiones para evitar el daño a sus cultivos y mejorar la producción y calidad de los mismos.

Estos sistemas en invernadero, son una alternativa que se ha venido desarrollando rápidamente y puede ser implementada en diversas condiciones adversas de clima y suelo y puede llevarse a cabo en una zona con potencial agrícola o en condiciones de agricultura urbana y periurbana [11] en los alrededores de las ciudades.

## 1.3 Objetivos e Hipótesis

### 1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema electrónico para la adquisición de datos (DAQ), eficiente y de bajo costo, para el seguimiento, registro, almacenamiento y exportación de variables agroclimáticas en invernaderos que cuenten con energía eléctrica, haciendo uso de las TIC's.

#### 1.3.1.1. Objetivos específicos

- Diseñar y desarrollar un software para la obtención, registro y exportación de las variables agroclimáticas: temperatura máxima y mínima, humedad relativa, humedad del sustrato, intensidad luminosa y concentración de CO<sub>2</sub> en invernadero.
- Dar seguimiento y registrar las variables fenológicas de mayor importancia en un cultivo de pepino bajo condiciones de invernadero e hidroponia como son: altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas, número de flores, número y peso de frutos y su relación con las variables agroclimáticas estudiadas y obtenidas.

#### 1.3.2. Hipótesis General

Es posible diseñar y construir un sistema electrónico, eficiente y con sensores de bajo costo, que permitan el registro, almacenamiento y la exportación de la información sobre variables agroclimáticas que afectan a los cultivos en invernadero.

##### 1.3.2.1 Hipótesis Específicas

- Es posible instrumentar un sistema electrónico con sensores de bajo costo, para el registro, almacenamiento y exportación de la información sobre temperatura máxima y mínima, humedad relativa, humedad del sustrato, intensidad luminosa y concentración de CO<sub>2</sub>.
- Dar seguimiento a las variables fenológicas del cultivo de pepino criollo, llevando un registro para realizar la relación respecto a las variables agroclimáticas obtenidas por el sistema.

Este trabajo está dividido en 5 capítulos, en el primero se han presentado los objetivos e hipótesis generales del mismo. En el capítulo 2 comienza con una breve reseña de la introducción de la mecatrónica hacia la agricultura, así como algunos conceptos relacionados con el monitoreo de variables agroclimáticas dentro de un invernadero. El capítulo 3 describe como se realizó el sistema de monitoreo, junto a la metodología que se usó. El capítulo 4 corresponde a los resultados obtenidos con la implementación del sistema. El capítulo 5 muestra las conclusiones finales acerca de este trabajo.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos sobre la investigación realizada para este trabajo. Se habla brevemente de la introducción de la mecatrónica en la agricultura dando paso a las variables agroclimáticas de suma importancia para el crecimiento y desarrollo de un cultivo. Por último, se describen los aspectos conceptuales que fundamentaron la construcción e implementación de este trabajo.

### 2.1 La mecatrónica en la agricultura

El desarrollo de las tecnologías que se están aplicando actualmente, están transformando cada vez más las formas en que la información se obtiene y se divulga en el sector agrícola. Un número de cuestiones afectarán la evolución de la agricultura, las demandas y oportunidades tecnológicas durante las décadas venideras. Estas influyen en la naturaleza cambiante de la pobreza, el reposicionamiento de la agricultura en las economías nacionales, el impacto de la urbanización de la liberación del comercio regional [12].

La mecatrónica es una técnica innovadora de mecanización dentro del ámbito de la ingeniería agrícola, que va más allá de los conceptos convencionales de mecanización y se basa en la sinergia obtenida con la combinación de diferentes áreas tecnológicas; Ingeniería de mecanización agrícola, instrumentación, sistemas de control y tecnología (inteligencia artificial e informática) [13]. Las aplicaciones en la agricultura son numerosas; son una realidad hoy en día; automatizado en la agricultura mediante los robots agrícolas. Por lo anterior este trabajo es una introducción al tema y las aplicaciones a varias ramas de la agricultura entre ellas, la agricultura protegida en México.

Hoy en día, se afirma que los avances tecnológicos ocurridos en los últimos años han supuesto una nueva era para la agricultura, la cual ha sabido adaptarse a los nuevos cambios, introduciendo en la metodología tradicional la tecnología

informática más moderna que existe. Esos avances tecnológicos incluyen sensores de bajo costo que pueden ser utilizados para el registro de las variables agroclimáticas que afectan a los cultivos en los invernaderos y que son la base para la toma de decisiones para lograr altos rendimientos de los cultivos.

Para la agricultura existen considerables beneficios en el terreno del desarrollo de tecnología, aunque sigue siendo uno de los terrenos de trabajo que plantean mayores retos y desafíos.

#### 2.1.1. Tecnología aplicada en invernaderos

La tecnología juega un papel muy importante para optimizar las decisiones en el campo a través de la información oportuna, veraz y fiable. La actividad agrícola se debe adaptar a la innovación tecnológica para mejorar sus procesos y así obtener mayores rendimientos.

El proceso y desarrollo de la tecnología en la agricultura son muy importantes, debido a que este sector es el encargado de abastecer a toda la población. La seguridad alimentaria debe garantizarse para los países de todo el mundo que enfrentan problemas de alto impacto como el cambio climático, escasez de agua, aumento de población y empobrecimiento de la misma [14]. Y son actualmente los sistemas de producción controlada o mejor conocidos como invernaderos, en los que los técnicos agrícolas, han puesto su esperanza y mayor esfuerzo para contribuir en el abastecimiento de alimentos de manera segura, ante los daños que pudieran ocurrir en la agricultura a campo abierto.

#### 2.1.2. Agricultura Tecnificada

La agricultura tecnificada brinda un aumento y una notable mejoría en los rendimientos de los cultivos, apoyados en el abastecimiento nutricional mediante

los fertilizantes y los agroquímicos como método del control de plagas y enfermedades, además de optimizar los recursos naturales como el agua al hacer uso de sistemas de riego de alta frecuencia. La tecnología de igual forma se ha adaptado a la agricultura a modo de desarrollar procesos agrícolas más eficientes, innovadores y seguros, a través de la creación de mapas de productividad acorde a las condiciones agroclimáticas del campo.

## 2.2. Sistemas y automatización de invernaderos

En la actualidad, la robótica y la información han permitido incrementar el alcance de la automatización, en varios sectores donde se utilizan sistemas electrónicos y mecánicos que permiten la automatización de procesos. La automatización se ha ido desarrollando rápidamente, se han creado nuevos avances tecnológicos y técnicos de control que son aplicados en diversas áreas como la industria, medicina, agricultura, entre otros.

Existen en el mercado muchos sistemas de automatización para el control de los parámetros climáticos de los invernaderos: apertura automática de cortinas para su ventilación, radiómetros que indican el nivel de luminosidad en el interior del invernadero, equipos de calefacción, etc. Los parámetros de control más relevantes para los invernaderos son los relacionados con el clima, el riego, el dióxido de carbono, la humedad, etc., pero tienen dos grandes desventajas: son muy caros y no son escalables [15].

Diferentes métodos y modelos de control son aplicados para controlar el comportamiento de las variables climáticas que afectan el entorno del invernadero. Se usan desde sistemas de control usando lógica clásica hasta sistemas de control inteligente, que usan lógica difusa, redes neuronales, entre otros. Además, se han desarrollado diferentes dispositivos y mecanismos que permiten medir y variar las variables de interés dentro del invernadero [16].

En los años 70, se desarrolló un elemento esencial en la rama de la electrónica y el control, se crea el microcontrolador. El cual está formado por un circuito integrado programable, quien ejecuta instrucciones grabadas en su memoria. El mejoramiento de estos dispositivos ha permitido, poder utilizarlos en diferentes situaciones y sistemas de automatización. Muchos horticultores ya poseen en sus invernaderos computadoras o microcontroladores de riego, con control de pH, CE y drenaje, algunos tienen controladores con lógica programable para el fertirriego, con un amplio tablero de algoritmos de control y de programación del riego (Figura 2.1).

El control electrónico, mediante controladores lógicos programables, la activación para la apertura de ventanas, para ventilación, riego, fertirriego, control de drenaje y con el monitoreo que se hace de las variables a modificar inicia la era de la mecatrónica en los invernaderos.



**Figura 2.1.** Tablero de algoritmos de control y de riego  
Fuente: Tomado de Novagric, Temporizador de Riego.

El tratamiento de la información está siendo clave en la transformación del sector agrícola, tanto a nivel teórico como tecnológico. La agricultura, como la mayoría de los sectores, depende de la disponibilidad y procesamiento oportuno de datos e información, por lo que no puede permanecer al margen del actual proceso general de informatización.

La concepción de un sistema de producción no puede sostenerse si no tiene la visión de una empresa agropecuaria; representa un tipo definido de sistema socio-económico, lo que hace sumamente complicado, debido a las interacciones difíciles

de controlar, sistemas biológicos, interdependencia de factores, mercado, mano de obra [17]

### 2.3. Antecedentes de la Agricultura

Uno de los acontecimientos más importantes en la historia humana ha sido el cambio de una economía sustentada en la caza y la recolección de plantas a una basada en la agricultura. Se ha planteado que este cambio ocurrió de manera independiente y paulatina en por lo menos seis regiones del mundo; a partir de los grupos recolectores-cazadores satisficieron sus necesidades de supervivencia diaria e iniciaron un largo proceso de manejo y selección que condujo a la agricultura y a la domesticación de plantas y animales[18].

La agricultura tradicional se deriva de la forma en el que se difunden los conocimientos, y se distingue por lo reducido de la cantidad y calidad de la energía usada en el agroecosistema, predomina en las tierras agrícolas del mundo con el climas favorables o marginales para la producción[19].

A lo largo del tiempo se han ido experimentando muchos cambios, un factor clave para la evolución de la agricultura fue la aparición de los plásticos, debido al impacto producido por la variación climatológica en el mundo ha ocasionado que la producción de cultivos enfrente un variado rango de competencia internacional con perspectivas muy favorables para los países de clima templado.

Estos contrastes climatológicos se han venido observando en los últimos años obligando a muchos de los agricultores a proteger sus cultivos contra los fenómenos climáticos adversos y de ese modo forzar la producción de ellos, a través de los años estas técnicas de protección desarrolladas en los países europeos han sido adaptadas a las condiciones de otros países y de esta manera se han encontrado nuevas formas de producción siendo uno de los aspectos más importantes en este cambio el uso de los plásticos y entre la diversificación se pueden observar notables incrementos en la superficie protegida en México[20].

Así pues, se establece la definición de “agricultura protegida”, se describen sus características y la dinámica que ha presentado, así como el entorno climático en el que se desarrolla esta actividad. También se presenta, en función del riesgo de la misma, en que estados se puede implementar esta actividad. Además, se describe el fenómeno de la vulnerabilidad respecto a la agricultura protegida en México. Por último, se describen los factores que inciden en el impulso de la agricultura protegida: el bajo nivel de la curva de aprendizaje de los interesados; la incertidumbre fitosanitaria; la elevada inversión de los invernaderos, los costos de operación para controlar temperatura y humedad relativa, o el mal diseño; la escala de producción. A favor de impulsar el desarrollo de la agricultura protegida, se concluye que los invernaderos son una alternativa viable para superar la producción generada en los minifundios[21].

La función principal de un invernadero es la de recrear las condiciones más apropiadas para dar vida y generar la reproducción de plantas de cualquier propósito, ya sean comestibles (como frutales y verduras), con fines medicinales, o de ornato. Para lograr lo anterior, se necesitan simular condiciones fisicoquímicas óptimas de temperatura, bióxido de carbono y humedad (entre otras) para el adecuado cuidado y crecimiento que requieren dichas plantas.

Actualmente en México los invernaderos de bajo nivel tecnológico, no son aprovechados al máximo, ya que dependen principalmente de la ventilación natural como mecanismos de control atmosférico, aunque son insuficientes para mitigar los efectos negativos de la temperatura y la humedad ambiental generadas en su interior, en un intervalo fuera de los valores óptimos para el desarrollo de los cultivos. Hay grandes fluctuaciones día/noche de los valores de la temperatura y la humedad relativa; además, los niveles normales de CO<sub>2</sub> disminuyen, especialmente durante las horas de mayor incidencia de radiación solar[22].

Actualmente los invernaderos están en su apogeo y están motivados por la tecnología la cual ha ido avanzando exponencialmente en los últimos 10 años, la implementación de un monitoreo automatizado permite una mayor calidad y mejores rendimientos.

El desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento, está condicionado por 5 factores climáticos:

- Temperaturas máximas y mínimas
- Humedad relativa
- Humedad del sustrato
- Intensidad luminosa
- Dióxido de carbono

Por lo tanto, es necesario que la conjunción de estos factores se encuentre dentro de un rango de mínimos y máximos los cuales, permiten que las plantas puedan desarrollar sus funciones. Con base en lo anterior, es importante dar un seguimiento a estas variables, ya que de ello depende el mejoramiento de los procesos y en la producción, logrando que sea más rentable en beneficio de los productores.

#### 2.4 Factores que afectan a los invernaderos

El clima influye en la agricultura en varias formas, porque la producción agrícola depende directamente de variables climáticas como: la temperatura, la precipitación, horas de sol, velocidad del viento, humedad relativa, como también la presencia esporádica de eventos climáticos adversos propios de la zona del altiplano, tales como la helada, el granizo, la sequía, las inundaciones por lluvias intensas y la nevada; todos estos eventos climatológicos ocasionan daños físicos, bajos rendimientos y pérdida en la producción de hasta un 100% en muchos casos [23].

## 2.5. Hidroponia en invernaderos

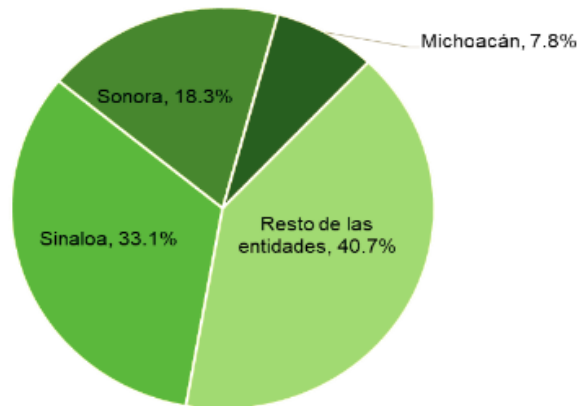
Actualmente la hidroponia se considera la agricultura del futuro, se define como la ciencia del cultivo sin suelo, pero con uso de un medio inerte, como arena gruesa, tezontle, agrolita, cascarilla de arroz, grava, entre otros, al que se agrega una solución nutritiva que contiene todos los elementos esenciales requeridos por la planta para su crecimiento normal y desarrollo. Puesto que muchos métodos hidropónicos emplean algún tipo de medio que contiene material orgánico como turba o aserrín, son a menudo llamados "cultivos sin suelo", mientras que aquellos con la cultura del agua serían los verdaderamente hidropónicos [24].

La agricultura hidropónica ha crecido relativamente rápido en México en los últimos años, los cultivos establecidos en horticultura son tomate: (54%), pepino (16%), pimiento (15%), berenjena (10%), otros (5%). Se estima que el total de los cultivos establecidos bajo cubierta, aproximadamente el 50% se encuentra cultivada en hidroponia (agua, fibra de coco, lana de roca, turba, tezontle, etc.) [25].

## 2.6. Cultivo de pepino en hidroponia

El pepino (*Cucumis sativus* L.) estudiado en este trabajo, es considerado como una planta monoica, que requiere polinización. Sus frutos inmaduros se consumen crudos en forma de ensalada u hortaliza y constituyen un alimento rico en calcio, fósforo, magnesio, potasio, manganeso y zinc; en vitaminas B y C; y en fitonutrientes como betacaroteno, betaxanteína y luteína [26]. En México se consume como fruta fresca (pepino) y en algunos casos como encurtidos (pepinillos)[27]. En los últimos años se ha ido incrementando la demanda de este fruto, de acuerdo con información del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), la producción de pepino en 2019 fue de 803 mil 706 toneladas. En México, casi 60% de la producción se concentró en tres entidades principalmente: Sinaloa, Sonora y Michoacán (Figura 2.2)[28].

Principales entidades productoras de pepino, 2019



Fuente: Elaboración propia con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

**Figura 2.2.** Porcentaje de producción del pepino, en los principales estados productores.

## 2.7. Requerimientos del cultivo del pepino

Para que un cultivo de pepino se pueda establecer bien y obtener buenos resultados en condiciones de invernadero, hay que considerar todos los factores que afectan su crecimiento, los cuales se describen en este documento.

### 2.7.1. Exigencias del cultivo de pepino en temperatura.

Para el buen desarrollo del cultivo del pepino en invernadero, se requieren temperaturas óptimas de noche y de día. La temperatura óptima de día, debe estar entre los 24 y 28 °C, y la temperatura óptima de noche entre los 18 y 20°C[29].

### 2.7.2 Exigencias del pepino en humedad relativa[29].

- El pepino tiene una gran superficie foliar y por lo tanto, un alto poder de transpiración. La planta transpira debido a las diferencias de presión de vapor entre su interior y el exterior. Para ello se abren o cierran los estomas.

- A la salida del sol, se calienta el aire y las hojas de la planta y se produce condensación sobre el plástico, las plantas y los frutos. Se abren los estomas y aumenta la transpiración y la humedad del aire.
- A lo largo del día se produce una baja de humedad. Pero en los meses fríos o en los momentos de amplio desarrollo foliar, no será suficiente, siendo necesario recurrir a la ventilación.
- Una humedad excesivamente alta afecta negativamente al cultivo disminuyendo la transpiración y el crecimiento y favorece la aparición de fisiopatías como la humectación, la gutación y la carencia de Calcio.
- Cuando hay poca vegetación y hace calor la humedad relativa puede bajar hasta un 25% y será necesaria la ventilación y la nebulización. Con plantas pequeñas pueden producirse necrosis en los ápices por deshidratación.
- Con niveles bajos de humedad, la hoja cierra sus estomas para reducir la transpiración, lo que afecta al desarrollo de la planta y del fruto, que crece más lentamente y es de menor calidad, con la punta afilada y deforme.
- La humedad relativa óptima para el buen desarrollo del cultivo del pepino durante la noche está entre 70 y 90% y durante el día entre 60 y 70 %.

### 2.7.3 Humedad del sustrato

El cultivo en sustratos o cultivo sin suelo, ha cumplido un papel determinante en la mejora del rendimiento y la calidad de la producción hortícola, principalmente cuando se realiza en ambiente protegido. Debido a las propiedades fisicoquímicas de la turba de Sphagnum, esta se tornó el principal componente de muchos de los sustratos, es usada como padrón de comparación de los nuevos materiales alternativos que van surgiendo.

La capacidad de retener humedad de los sustratos es uno de los criterios de selección cuando se evalúan diversos materiales para componer una mezcla que pueda ser usada como sustrato, dado que esa retención define en gran medida la disponibilidad de agua para los cultivos. Un adecuado suministro de agua define en buena medida el crecimiento, desarrollo y producción de las plantas, al ser el agua

el vehículo que permite la incorporación de los nutrientes presentes en la solución que será absorbida por las raíces de la planta[30].

#### 2.7.4. Exigencias de radiación fotosintética activa o intensidad luminosa (PAR)

Las especies vegetales tienen la capacidad de responder de diferentes formas a la calidad de la luz, entendida esta como el color o la longitud de onda; a su intensidad, es decir, la densidad del flujo fotónico o irradiancia y a la combinación de ambas. La calidad de la luz afecta el crecimiento, desarrollo y morfología de las plantas. Las plantas utilizan luz desde 400 hasta 700 nm para realizar la fotosíntesis, conocida como radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) [31].

#### 2.7.5 Exigencias de concentración de CO<sub>2</sub>

Uno de los nutrientes más importantes en el abastecimiento nutrimental de los cultivos en general, es el Carbono y es aquel en que los técnicos y productores de hortalizas en invernaderos de mediana o bajos niveles tecnológicos o cultivos tradicionales en campo, no lo toman en cuenta. Este nutriente solo, representa del 44 al 49% de la materia seca de los cultivos y sus funciones en la planta son las siguientes: a) Es el principal constituyente de la materia viva de la planta, b) Está presente en todas las biomoléculas como carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos[30]. Se da por hecho que le corresponde a la naturaleza satisfacer esta necesidad.

La concentración óptima de CO<sub>2</sub> depende del tipo de especie que se cultive y los niveles óptimos de crecimiento alcanzan las 1.000 ppm (partes por millón) en la mayoría de los cultivos. La fotosíntesis activa puede reducir la concentración de CO<sub>2</sub> de un invernadero a un nivel de 200 ppm, que es lo suficientemente bajo para afectar el crecimiento de las plantas en forma negativa. Un nivel demasiado bajo de CO<sub>2</sub> limita el crecimiento; sin embargo, un nivel demasiado alto de CO<sub>2</sub> tampoco es bueno. La fertilización con CO<sub>2</sub> produce un buen aumento de precocidad, de

rendimientos y de la calidad de la cosecha. Para mantener unos niveles aceptables se recurre a abrir la ventilación[30].

### III.- METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los principales componentes usados en la construcción del sistema de monitoreo, así como, el diseño y desarrollo del software utilizado para el monitoreo de las variables en el invernadero, abarcando desde el código hasta la conexión de los componentes.

#### 3.1 Diseño del sistema de monitoreo y obtención de datos

El desarrollo de este proyecto tuvo como objetivo la construcción de un sistema de monitoreo de las variables agroclimáticas que afectan a un cultivo hidropónico de pepino. Para ello se utilizó como interfaz una tarjeta Raspberry pi 3b+ y como nodos de adquisición de datos se empleó una tarjeta Arduino UNO. Ambos constituyentes permiten la adquisición y almacenamiento de los datos referentes a diferentes variables agroclimáticas (temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato, concentrado de CO<sub>2</sub>, intensidad de luz).

Este proceso se llevará a cabo en función de la metodología siguiente:

1. Consulta de la literatura y bibliografía: Para conocer y establecer el estado del arte recopilando información de proyectos realizados en esta área.
2. Realizar el diseño de un sistema de medición y adquisición de datos usando los conceptos de electrónica y programación de las tarjetas a utilizar.
3. Experimentación del funcionamiento de monitoreo del sistema de adquisición de variables.
4. Como última etapa, la obtención de resultados y conclusiones, para encontrar mejoras y soluciones a los cultivos en invernaderos actuales.

### 3.2 Elección de Componentes

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó la plataforma Arduino, para la red de sensores almacenamiento y registro se usó la plataforma de Raspberry, debido a que son accesibles y de bajo costo, comparando con otras tecnologías elaboradas por empresas reconocidas como Pentacom que tiene un equipo de medición con un costo de \$26,906.56 MXN.

En este trabajo de investigación, las variables que se incluyeron por considerarse de mayor importancia debido al crecimiento y desarrollo del cultivo al momento de operar un invernadero son las siguientes: Temperatura máxima y mínima, humedad relativa, humedad del sustrato, intensidad luminosa y concentración de dióxido de carbono.

Los dispositivos usados para estas mediciones y sus costos a precios de 2020 se muestran en el Cuadro 1.

1. Sensor DHT22 digital. Fue utilizado para medir la temperatura mínima y máxima al interior del invernadero y su registro fue en °C.
2. Sensor DHT22 digital. Fue utilizado para la humedad relativa y su registro en porcentaje
3. Sensor BH1750 digital. Seleccionado para medir la intensidad luminosa en el invernadero en  $\mu\text{moles}/\text{m}^2\text{s}$ .
4. Sensor de humedad de capacitivo (se midió el % de agua)
5. Sensor MH-Z19 analógico. Usado para tomar la concentración de dióxido de carbono y se midió en ppm.

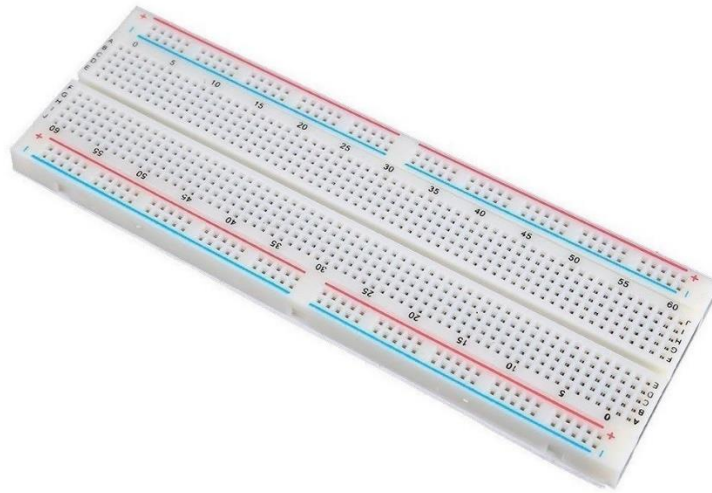
**Tabla 1.** Comparación de precios con Pentacom.

<b>Equipo</b>	<b>Costo/unidad MN</b>	<b>Equipo</b>	<b>Otra Tecnología Costo/unidad comercial</b>
Sensor de Temperatura y humedad relativa	130.00 MXN	Sensor de temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica.	6,960.00 MXN
Sensor de intensidad lumínica	80.00 MXN		
Sensor de CO <sub>2</sub>	700 MXN	Sensor de CO <sub>2</sub>	17,400.00 MXN
Sensor de humedad de suelo	150.00 MXN	Sensor de humedad de suelo	No lo maneja
Tarjeta Arduino	250.00 MXN		
Tarjeta Raspberry 3B+	1,500.00 MXN		
Pantalla táctil para raspberry pi 3b+	300.00 MXN		
<b>Total</b>	<b>31,10.00 MXN</b>		<b>24,360.00 MXN</b>

### 3.3 Montaje del circuito

- El montaje del circuito se caracteriza por la presencia de un "protoboard", que es un dispositivo electrónico que incluye una placa de prueba que permite conectar los componentes entre sí sin necesidad de soldar los componentes y ello facilita el armado de circuitos o sistemas electrónicos. Fue seleccionado un protoboard de 830 puntos para tener un buen manejo

de pruebas adecuado para las conexiones necesarias de los dispositivos que se usaron.



**Figura 3.1.** Protoboard o placa de pruebas de 830 puntos utilizado.

- Jumpers: Cables de conexión. Estos cables se utilizan para realizar las conexiones entre los sensores, el tablero Protoboard y la placa Arduino, se observa que cuenta con diferentes colores que no son utilizados para conexiones específicas, sino son colores que se pueden utilizar de manera aleatoria.



**Figura 3.1.** Jumpers, cables de conexión para protoboard.

Placa Raspberry Pi 3b+: La Raspberry Pi es un ordenador de bajo costo y tamaño reducido, tanto es así que cabe en la palma de la mano, pero puedes conectarle un televisor y un teclado para interactuar con ella exactamente igual que cualquier otra computadora. Esta fue seleccionada por sus características.



**Figura 3.3.** Placa Raspberry Pi 3b+

Para que el usuario pueda acceder y manejar la interfaz para obtener los datos de las mediciones se utilizó una pantalla lcd de 3.2 pulgadas; que se vincula a través del conector GPIO usando un total de 26 puertos, con una interfaz SPI y dispone de una película táctil resistiva que permite detectar pulsaciones.



**Figura 3.4.** Pantalla lcd 3.2 pulgadas para Raspberry

Debido a que la placa Raspberry pi 3B+ cuenta con 40 pines y al usar la pantalla se ocuparon 26 pines, los pines disponibles que fueron 14 estaban designados a otras áreas por lo que no pudieron utilizar para conectar la red sensores ahí; por lo que se optó por utilizar la placa Arduino para la red de sensores.

Placa Arduino uno: es una placa que tiene todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador. Es decir, es una placa impresa con los componentes necesarios para que funcione el microcontrolador y su comunicación con un ordenador a través de la comunicación serial. Pero, ¿qué es un microcontrolador? Se trata de una plataforma de hardware libre. Cuenta con un circuito integrado mediante el cual se pueden grabar instrucciones. A su vez, estas instrucciones se escriben usando un lenguaje de programación que permite al usuario establecer programas que interactúan con circuitos electrónicos.



**Figura 3.5.** Placa Arduino UNO

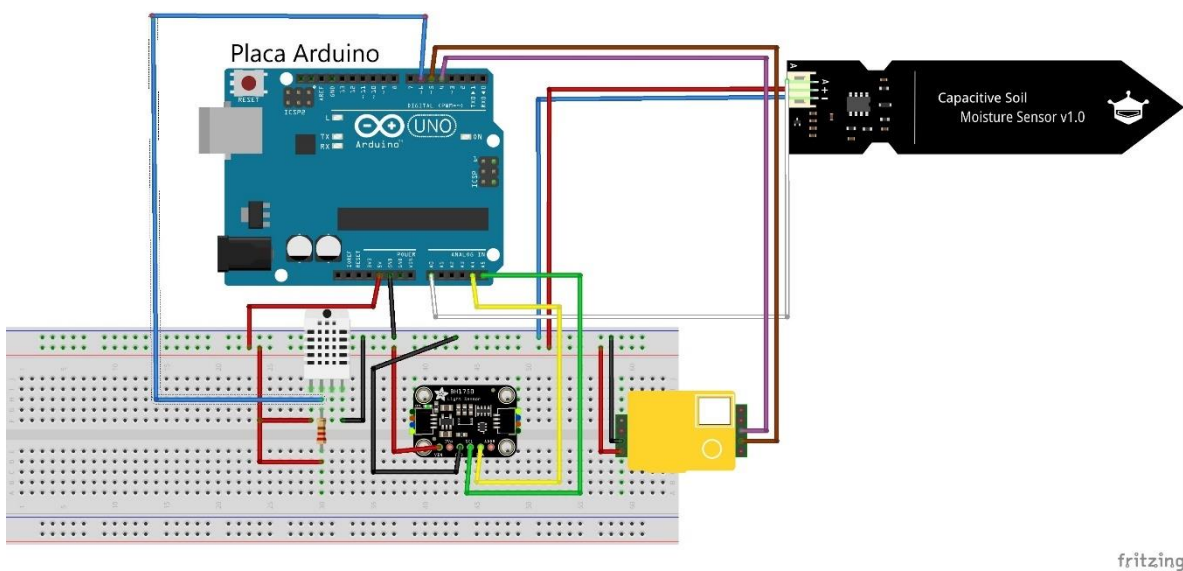
En la tabla 2, se muestra la asignación de puertos, en donde el pin de señal del DHT22 se conectó a la entrada de modulo digital de la placa Arduino, debido a que el sensor es digital, es decir, que produce una señal digital en respuesta a lo que mide en la entrada, lo mismo ocurre con el sensor BH1750 debido a que el sensor

es digital. Para el sensor de humedad capacitivo debido a que es un sensor analógico, es decir, que la señal analógica que produce está basada en lo que percibe, se conectó al módulo de entradas análogo, que se caracterizan por leer valores de tensión de 0 a 5 Voltios con una resolución de 1024 (10 bits). Por último, el sensor MH-Z19 se conectaron sus 2 pines de comunicación por UART se conectaron a las entradas asignadas TX y RX asignadas a los pines 4 y 5 del módulo de entradas digitales .

**Tabla 2.** Asignación de puertos en la placa Arduino uno.

Dispositivo	Asignación de Puertos
DHT22	6
Sensor de Humedad Capacitivo	A0
MH-Z19	RX(4) TX(5)
BH1750	7

En la Figura 3.6, se puede observar el circuito montado con los sensores conectados, de acuerdo con la asignación de puertos que indica en el Cuadro 2, sin embargo, no se incluye la conexión entre la placa Arduino y placa Raspberry 3b+, donde la conexión es por medio de un cable USB.



fritzing

### **Figura 3.6.** Conexiones de los sensores con la placa Arduino.

#### 3.4 Fase de programación

El tipo de programación que utiliza la placa Arduino UNO es la de a misma plataforma Arduino se programa con un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing, lo que significa que es similar a C++.

Con respecto a la Raspberry Pi, se utilizan diferentes tipos de lenguajes para programar, en este caso, se utilizó Python porque es un lenguaje de programación interpretado, multiparadigma y multiplataforma usado, principalmente, en Big Data, AI (Inteligencia Artificial), Data Science, frameworks de pruebas y desarrollo web.

La primera parte de la programación se realizó con la placa Arduino UNO, como primera parte del código se muestran las primeras líneas, donde se incluyeron las librerías de los sensores como se observa en la Figura 3.7, sin estas librerías los sensores no pueden funcionar:

Para el sensor BH1750 se usa la librería wire debido a que trabaja por medio del bus I2C, donde su arquitectura es maestro/esclavo, es muy utilizado por su simplicidad debido a que se conectan con dos líneas: SDA o serial data, y SCL o serial clock.

Para el sensor MHZ19 se usa la librería uart, debido a que trabaja por medio del bus de comunicación UART, donde su relación es uno a uno, debido a que consiste en 2 líneas de comunicación correspondiente a TX y RX.

```
#include "DHT.h"  
#include <BH1750.h> // incluye libreria BH1750  
#include <Wire.h> // incluye libreria para bus I2C  
#include <MHZ19_uart.h>
```

**Figura 3.7.** Bibliotecas para Arduino

Se tienen las líneas donde se expresarán los pines que se van a utilizar de la tarjeta para comunicarse con el programa como se observa en la Figura 3.8 y a su vez se declararán las variables en donde se guardan los datos obtenido por el sensor.

```
#define DHTPIN 6
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302), AM2321
const int rx_pin = 5; //Serial rx pin no
const int tx_pin = 4; //Serial tx pin no
const int dry = 563; // valor del sensor seco
const int wet = 214; // valor del sensor mojado
int temperatura, humedad;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
BH1750 sensor; // crea objeto con nombre sensor
MHZ19_uart mhz19;
```

**Figura 3.8.** Declaración de variables

Para la cuarta y penúltima parte, en la Figura 3.9 se tienen la inicialización de cada uno de los sensores.

```
void setup() {
  Wire.begin(); // inicializa bus I2C
  sensor.begin(); // inicializa sensor con valores por defecto
  Serial.begin(9600);
  mhz19.begin(rx_pin, tx_pin);
  mhz19.setAutoCalibration(false);
  dht.begin();
}
```

**Figura 3.9.** Inicialización del código.

En la parte final, se mandan a imprimir por el puerto serial los datos obtenidos por los sensores, se definió un Delay (tiempo de muestreo de 10 min).

En términos de programación ese delay se ve expresado en milisegundos (600000 milisegundos equivalen a 10 minutos). Para las líneas de código donde se manda a imprimir los datos con el código serial.print esos valores se convierte a String para evitar errores de programación como se observa en la Figura 3.10.

```

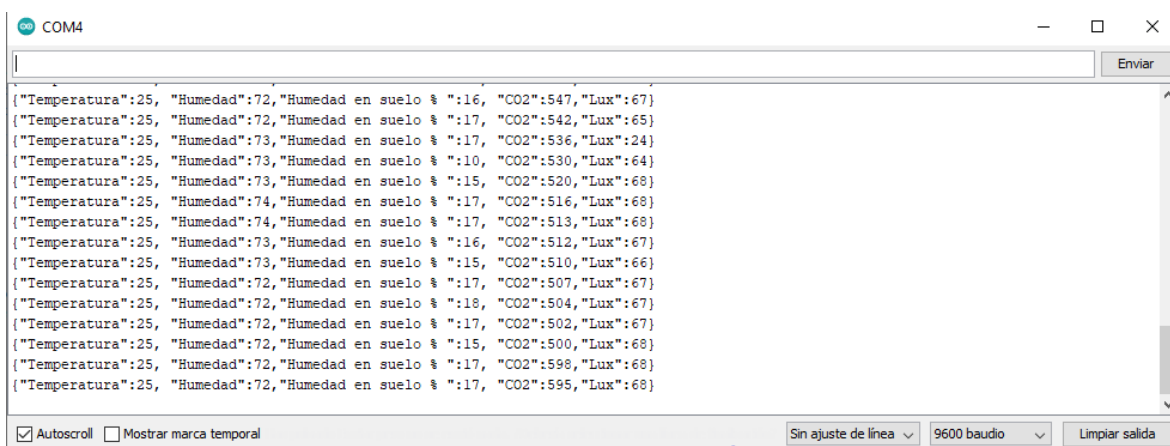
void loop() {
  delay(6000);
  humedad = dht.readHumidity();
  temperatura = dht.readTemperature();
  unsigned int lux = sensor.readLightLevel();
  int sensorVal = analogRead(A0);
  int percentageHumidity = map(sensorVal, wet, dry, 100, 0);
  int co2ppm = mhz19.getCO2PPM();
  int temp = mhz19.getTemperature();

  Serial.print("{\"Temperatura\": "+(String)temperatura + ", \"Humedad\": "+(String)humedad + ", \"HumedadS % \": "+(String)percentageHumidity +

```

**Figura 3.10.** Líneas de código para imprimir los resultados.

Una vez que se implementó el código con los 4 sensores que se utilizaron, se realizó una prueba abriendo el puerto serial desde la plataforma Arduino para verificar el recibimiento de los datos como se observa en la Figura 3.11.



**Figura 3.11.** Obteniendo datos por puerto serial

Por consiguiente, se desarrolló el script en python dentro del sistema de la placa Raspberry 3b+ para realizar la comunicación y a su vez almacenar y exportar los datos obtenidos por la red de sensores de la placa Arduino.

En las primeras líneas del código, se incluyeron las librerías siguientes; en donde serial es la que hace la comunicación entre Python y Arduino, simplejson es para que el programa se pueda ejecutar y por último CSV como se observa en a Figura 3.12. La cual almacena estos datos en un archivo csv; este es un cualquier archivo

de texto en donde los caracteres están separados por comas, haciendo una especie de tabla en filas y columnas, este archivo se identifica con el programa Excel.

```
import serial
import simplejson
import csv
```

**Figura 3.12.** Librerías a utilizar en Python.

Para la siguiente parte, se especificó el puerto de conexión y las variables que se utilizaron, en este caso, se declararon y a su vez, se almacenaron en nuestra variable MyData como se observa en la Figura 3.13.

```
ser = serial.Serial('COM4', 9600)
x = []
y = []
z = []
a = []
b = []
myData = [{"x", "y", "z", "a", "b"}]
```

**Figura 3.13.** Declaración de variables a importar

En la Figura 3.14, se observa que después de haberse definido las variables, se especificó el nombre de cada una de variables, de acuerdo a la definición que se estableció en el programa de Arduino.

```
jsonResult = ser.readline()
try:
    jsonObject = simplejson.loads(jsonResult)
    myData.extend([[int(jsonObject["Temperatura"]), int(jsonObject["Humedad"]), int(jsonObject["Lux"])])
    x.append(int(jsonObject["Temperatura"])), y.append(int(jsonObject["Humedad"])), z.append(int(jsonObject["Lux"]))
    print(jsonObject["Temperatura"], jsonObject["Humedad"], jsonObject["Lux"])
```

**Figura 3.14.** Definición de variable.

Para finalizar el script, con estas líneas de código se creó el archivo en csv y se definió nombre del archivo, en este caso fue “**datos\_sensores**” como se observa en la Figura 3.15.

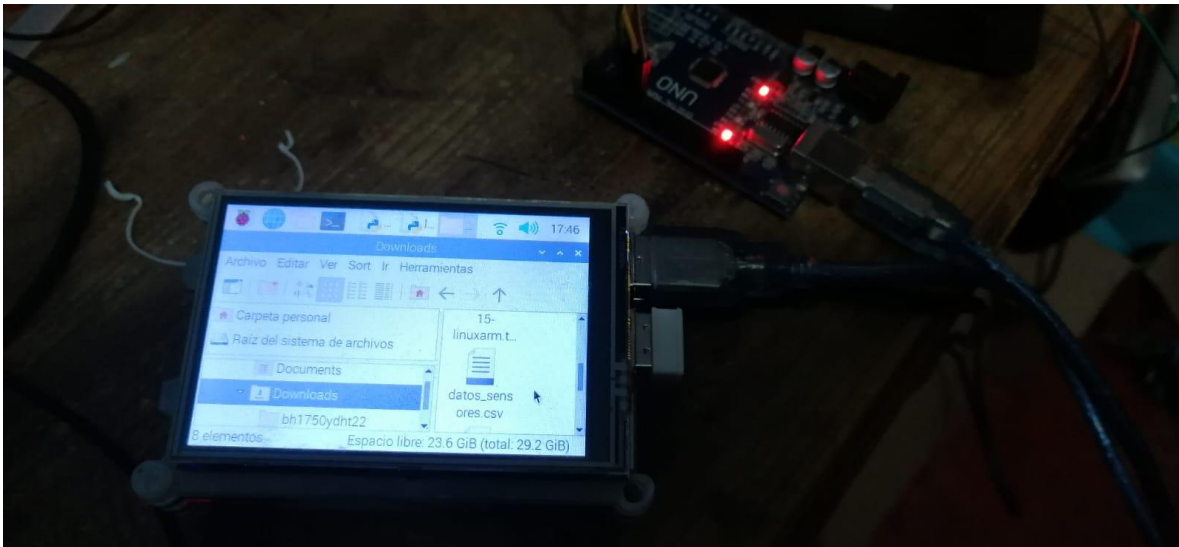
```

pass
with open ('datos_sensores.csv', 'w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file, delimiter=';')
    | writer.writerows(myData)
print("escritura completa")

```

**Figura 3.15.** Definición del nombre del archivo en csv.

Se realizó una prueba para verificar que se almacene la información en la tarjeta Raspberry, como se observa en la fig. 3.16. Finalizado la parte de programación, se procedió a instalar el sistema en el invernadero.



**Figura 3.16.** Creación del documento en csv.

### 3.5 Obtención de las variables fenológicas del cultivo.

El montaje del sistema de monitoreo se instaló en un invernadero ubicado en la comunidad de San Agustín Calvario, que se encuentra en la ciudad de Cholula, Puebla, debido a la situación que afecta la pandemia por COVID-19 y que no fue posible instalarlo en la Universidad.

Se estableció un cultivo comercial de pepino criollo, en bolsas negras de vivero con arena de tezontle como sustrato. Se pusieron 48 bolsas con 15 kg de arena seca cada una y con dos plantas por bolsa en condiciones de hidroponía en un área aproximadamente de  $12m^2$ . La siembra se realizó el día 18 de marzo del 2021 de manera directa, aplicando dos litros de agua antes de la siembra para humedecer el sustrato. El riego se llevó a cabo diario con la solución nutritiva Steiner al 100 % y la cantidad de acuerdo con su etapa de desarrollo.

Las variables fenológicas medidas, se llevaron a cabo por muestreo de 10 plantas a lo largo del ciclo y fueron: altura de planta tomada con una regla en cm; el diámetro de tallo con un vernier en mm; número de hojas, número de flores y número de frutos, peso de los frutos en fresco y su materia seca. El monitoreo se realizó durante casi cinco meses (marzo a julio), dando seguimiento al crecimiento de las plantas.

El pepino criollo estudiado es un cultivo que requiere de polinización, la cual realizan las abejas en campo abierto, pero en el invernadero se hizo el mayor esfuerzo para dar movimiento a las plantas por la mañana para favorecer la polinización. Esta función normalmente en el interior de los invernaderos la llevan a cabo los abejorros o se realiza manualmente como se hizo en esta investigación[32].

Se optó por ubicar el equipo en la parte media del invernadero, para un mejor registro de la información, como se observa en la Figura 3.17. Se programó el equipo para el registro de los datos de las cinco variables cada diez minutos. Ello implicó una cantidad de información muy grande y se tomó la decisión de analizar aquella que se registró cada hora iniciando con las 11:58 horas, identificando los periodos óptimos de cada variable y las horas más frías y más calientes del día.

El periodo más caliente del día al interior del invernadero ocurre entre las 11:00 y las 15:00 horas y la temperatura más fría se presenta entre las 05:00 y las 08:00 horas y tomando en cuenta los periodos óptimos de cada variable se realizaron las gráficas en función de medias mensuales. La exportación de los datos, se realizó

una vez a la semana de manera manual mediante una usb y los datos se llevaron al escritorio y se vaciaron en una hoja de cálculo Excel.



**Figura 3.17.** Instalación del sistema de monitoreo en el Invernadero

Es importante mencionar, que debido a las circunstancias actuales en las que se realizó esta investigación, afectadas drásticamente por la pandemia de Covid-19, no se pudo llevar a cabo la comparación entre los resultados obtenidos y una estación climatológica.

## IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de acuerdo con la información captada de las variables agroclimáticas por el sistema de monitoreo, a su vez, se realiza la correlación con las variables fenológicas.

### 4.1 Germinación del cultivo.

El cultivo comercial de pepino establecido en siembra directa el 18 de marzo del 2021, presentó su germinación en la segunda semana de marzo, después de cinco días. Su distribución fue en seis hileras, con ocho bolsas o macetas en cada una de ellas, dejando dos plantas por bolsa.



**Figura 4.1.** Distribución y germinación del cultivo

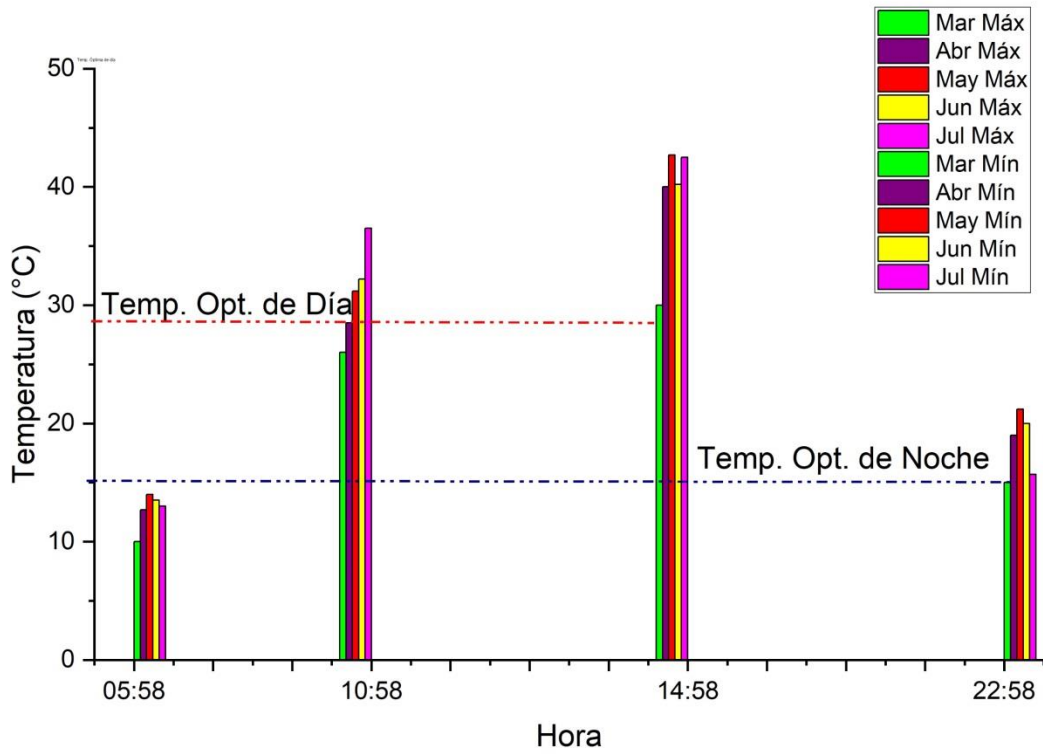
### 4.2 Temperatura

El sensor de temperatura registró los datos que se requirieron para dar seguimiento a las diferentes etapas fenológicas a lo largo del ciclo del cultivo. Se tomaron muestras de temperatura cada hora de las cuales se obtienen las temperaturas medias de cada mes con la finalidad de tener un valor representativo de todo universo de datos.

Con la información recabada, se construyó la gráfica que se muestra en la Figura 20, donde se observa el comportamiento de la variable temperatura a lo largo del ciclo del cultivo, marcando tres etapas que describen las condiciones óptimas y las condiciones extremas. Se marcan con una línea punteada de diferentes colores, la línea punteada roja muestra la temperatura máxima óptima del día ( $28^{\circ}\text{C}$ ), mientras que la línea punteada azul muestra la temperatura mínima óptima de noche, que se encuentra a los  $15^{\circ}\text{C}$ .

En la Figura 4.2, se observa que a las 05:58 horas, momento en el que se identifica la temperatura más baja del día en el invernadero, la temperatura media mínima óptima no se alcanza en ninguno de los meses, quedando siempre por debajo de los  $15^{\circ}\text{C}$ , y aunque están por debajo del umbral, destaca el mes de marzo con la temperatura más baja alrededor de los  $10^{\circ}\text{C}$ , seguido por el mes de abril con  $15^{\circ}\text{C}$ . Si bien estas temperaturas no son letales para el cultivo, la planta sufre un estrés que más tarde se reflejará en una menor producción.

La línea roja muestra la temperatura máxima óptima del día ( $28^{\circ}\text{C}$ ), es decir que la temperatura caliente se encuentra entre las 10:58 y las 14:58 hrs, luego inicia el descenso. A esta temperatura la planta sufre estrés y el polen muere, esto se refleja directamente en la falla de polinización y en consecuencia en el cuajado de frutos. La Figura 4.2, indica que a las 14:58 horas todos los meses sobrepasan los  $28^{\circ}\text{C}$ , mientras que a las 10:58 solo el mes de abril se encuentra en las condiciones óptimas[33]. En estas condiciones se debería de tomar la decisión de bajar la temperatura del invernadero mediante algún sistema de enfriamiento.



**Figura 4.2.** Temperaturas Máximas y Mínimas



**Figura 4.3.** Evolución de las plantas en abril.

### 4.3 Humedad relativa

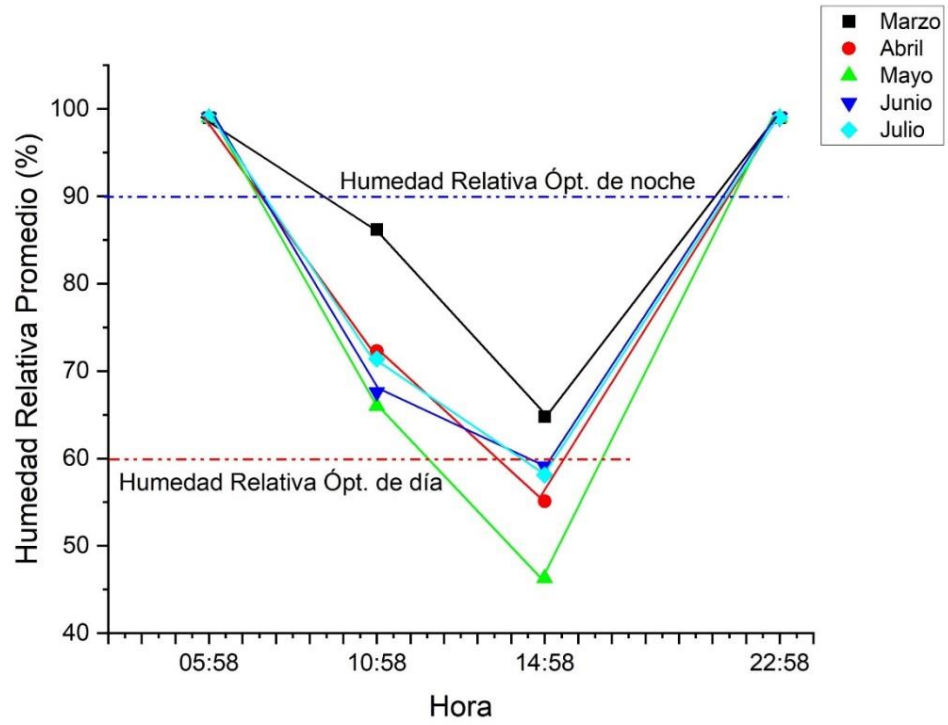
La humedad relativa es una de las variables más importantes y sensibles a la temperatura y excluyentes, es decir al subir temperatura la humedad relativa disminuye (variables inversamente proporcionales) y esto afecta directamente al cultivo ya que la planta se estresa. La humedad relativa está íntimamente ligada con la transpiración y el crecimiento de la planta[34].

El sensor de humedad relativa muestra el porcentaje de agua que hay en el ambiente, como se observa en la Figura 22. La grafica está dividida en tres partes y dos líneas punteadas; la línea punteada azul muestra la humedad relativa óptima para la planta en la noche siendo esta de un 90% y se puede apreciar que todos los meses cumplen ya que no se tiene el efecto de la temperatura[29].

La línea punteada roja muestra la humedad relativa óptima del día que se encuentra en un 60% y solo en el mes de junio se cumple con esta condición. Se observa que los meses de abril, mayo y julio están por debajo del 60% de humedad debido a las altas temperaturas presentes en un horario de 14:58 hrs., cuando se alcanza la máxima temperatura.

Se ha reportado que en el año 2005 una humedad excesivamente alta afecta en consecuencia negativamente al cultivo disminuyendo la transpiración y el crecimiento y favorece la aparición de enfermedades [29]. Como se observa en la Figura 23, se presentó en las hojas del pepino el ataque de un hongo conocido como cenicilla (*Sphaerotheca fuliginea* Schlechtend.:Fr, Pollaci).

Para el caso de la humedad relativa, se muestra el comportamiento en la Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Comportamiento de la Humedad Relativa

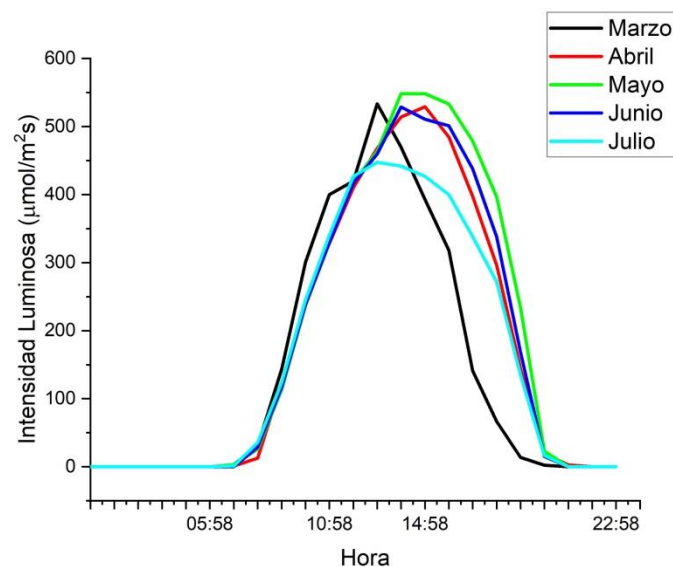


**Figura 4.5.** Presencia de cenicilla en las hojas del cultivo de pepino

#### 4.4 Intensidad luminosa

Esta variable intensidad luminosa indica como la planta fotosintetiza los carbohidratos. Cuando existe una intensidad luminosa extrema se aplica cal agrícola sobre el plástico de los invernaderos para disminuir la incidencia luminosa.

La Figura 4.6 muestra que todos los meses cumplen con una intensidad luminosa óptima, y es adecuada para el tipo de cultivo que se está monitoreando[35], considerado como cultivo neutro por su demanda de luz.



**Figura 4.6.** Comportamiento de la intensidad luminosa.

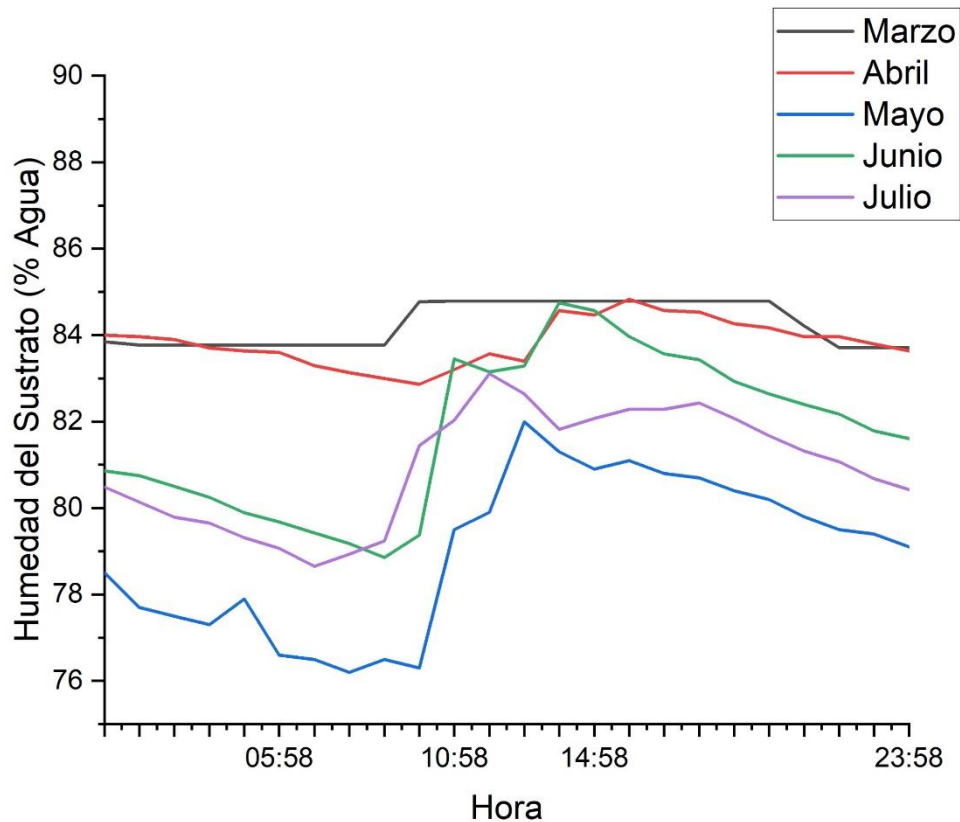
En la misma Figura 4.6, se aprecia la distribución de la intensidad luminosa a lo largo del día, con claras diferencias en el mes de marzo debido a que los días son más cortos, con respecto a abril, mayo y junio, es debido al cambio de horario que se presentó en abril, por ende, los días son más largos. Para el caso de Julio, se debe por la alta frecuencia de tormentas en las tardes.

#### 4.5 Humedad del sustrato

La humedad del sustrato, no se obtuvo con mucha precisión debido a que en ocasiones se regaba con solución nutritiva[36] en las tardes, otros días en la mañana y otros no se regaba. Uno de los inconvenientes fue la ubicación del invernadero, ya que había que ir diario a Cholula. Pero siempre se cuidó que los valores de humedad no alcanzaran los valores extremos (25% y 90%). En la Figura 25, se ve el comportamiento de la gráfica de los 5 meses.

Se observa que en mayo la temperatura es muy alta como se observa en la Figura 4.7, la planta tenía dos meses y medio en el cual se da el primer corte de frutos y la planta muestra la mayor demanda de agua. Se observa que en la noche no se tiene mayor problema, pero en cuanto amanece disminuye la humedad del sustrato debido a que la planta comienza a transpirar.

En el mes de marzo la planta es pequeña y su demanda de humedad es poca, y la humedad del sustrato se observa muy estable, a diferencia del mes de julio en donde ya se realizaron tres cortes y la planta exige mayor demanda de humedad debido a su propio tamaño y al llenado de los frutos.

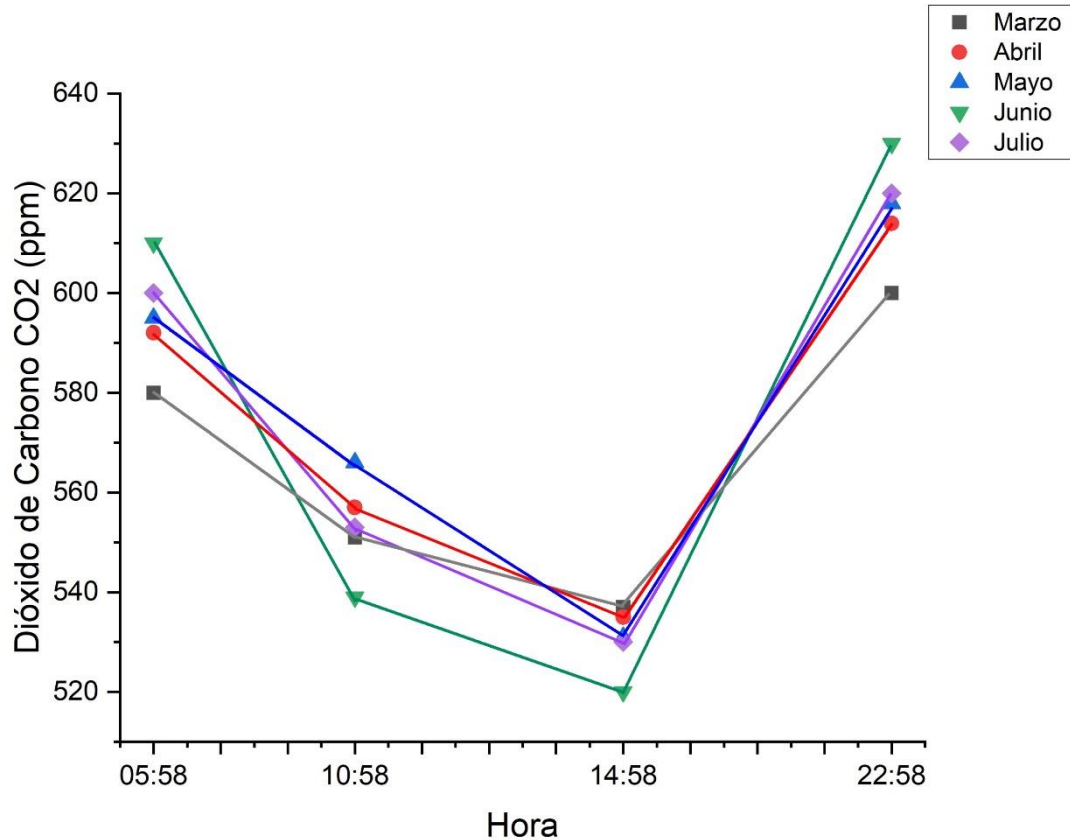


**Figura 4.7.** Comportamiento de la humedad del sustrato

Siendo así, se tuvo en total que se gastó aproximadamente 85 litros de solución nutritiva por cada bolsa durante todo el cultivo, el sustrato hizo que se guardara la humedad y la planta fuera absorbiendo poco a poco esa agua[37].

#### 4.6 Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>

Esta variable se midió en el ambiente del invernadero con un sensor de emisiones, lo cual explica la Figura 4.8, en la medida que va realizando el proceso de la fotosíntesis la planta absorbe la mayor cantidad de CO<sub>2</sub>, caso contrario ocurre durante la noche donde se observa la parte inversa es decir la planta ya no absorbe CO<sub>2</sub> y ahora su proceso es libera CO<sub>2</sub>[38].



**Figura 4.8.** Comportamiento del CO<sub>2</sub> dentro del invernadero.

En la Figura 4.8, se tiene que en la noche hay un aumento considerable en el número de ppm, como comenta Barrazueta, Livizaca[39] “Durante el día, las plantas absorben el dióxido de carbono y producen oxígeno, necesario para respirar. De noche, el proceso se invierte y las plantas comienzan a producir dióxido de carbono”.

Teniendo en cuenta que una concentración óptima de CO<sub>2</sub> ronda entre los 600 ppm y 1000 ppm en un invernadero[40], en este caso se tiene una concentración por debajo de límite de 600 ppm durante el día y durante la noche sobrepasa los 600

ppm, lo anterior es muy lógico y normal, pues la planta en el día absorbe CO<sub>2</sub> y libera Oxígeno y en la noche ocurre el proceso inverso.

#### 4.7 Seguimiento a variables fenológicas.

##### 4.7.1 Altura de planta

Teniendo un mejor enfoque en las variables que se vieron implicadas el monitoreo, se realizó tomando en cuenta el crecimiento del cultivo. Se seleccionaron al azar 10 plantas para monitorear el crecimiento semanal de cada una de ellas, graficando solamente la última semana de cada mes, la variabilidad en la altura de las plantas muestreadas es debido por una parte a la genética misma de la planta y por otra al incremento de temperatura al finalizar el invierno y desde luego a su propio desarrollo.

Los datos de las variables fenológicas, se tomaron los miércoles de cada semana, para dar seguimiento al desarrollo de la planta. En la Figura 4.9, se presenta una imagen de la altura alcanzada por la planta hasta esta fecha.

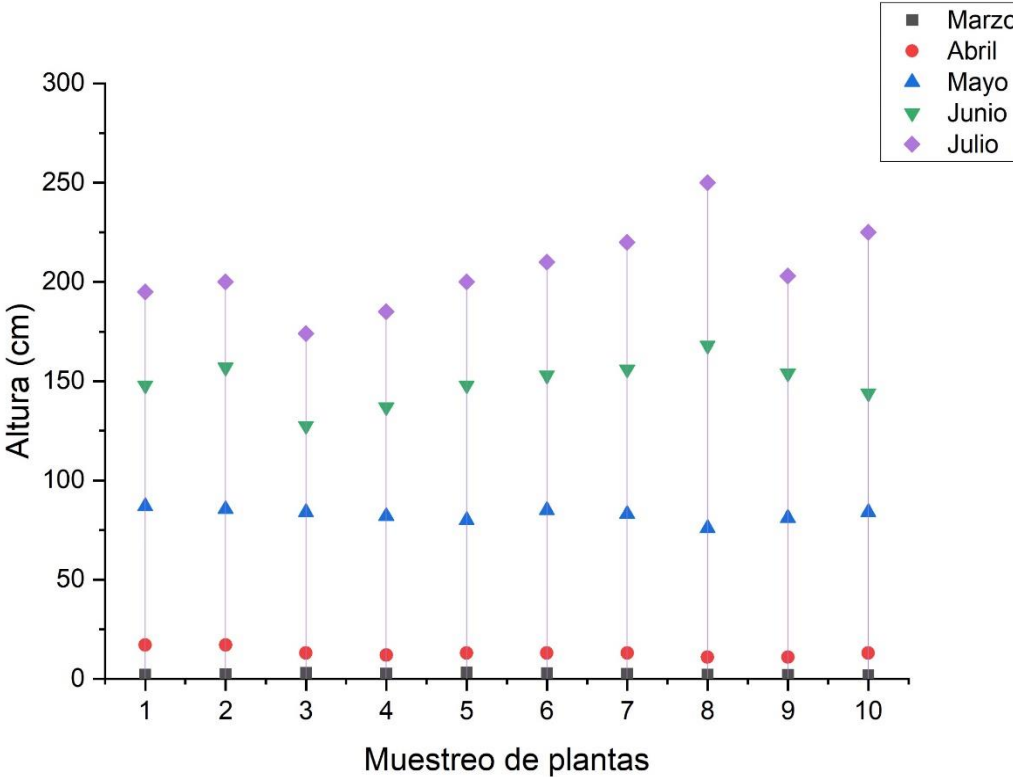


**Figura 4.9.** Comportamiento de la altura de plantas.

En la Figura 4.9, se puede apreciar que en marzo el crecimiento de las plantas fue escaso, por debajo de los 3 cm, pues fue el periodo de germinación y la aparición de las primeras hojas verdaderas con la presencia de bajas temperaturas. En abril, se observa un ligero incremento de temperatura y de altura de la planta, hasta alcanzar los 15 cm. Se aprecia en contraste de ambos meses, con el crecimiento alcanzado por la planta en mayo. Se observa homogeneidad en el crecimiento con promedio de alrededor de 0.9 m. Es esta etapa del cultivo cuando está en plena producción de pepino. La Figura 4.10, sobre la altura de plantas, se construyó con datos de la última semana de cada mes.

Ya en el mes de junio se observa un crecimiento más heterogéneo debido a que cada planta ya tiene diferente carga de frutos. En la última etapa del cultivo, en julio se observa que existen plantas que se desarrollaron más que otras debido a su

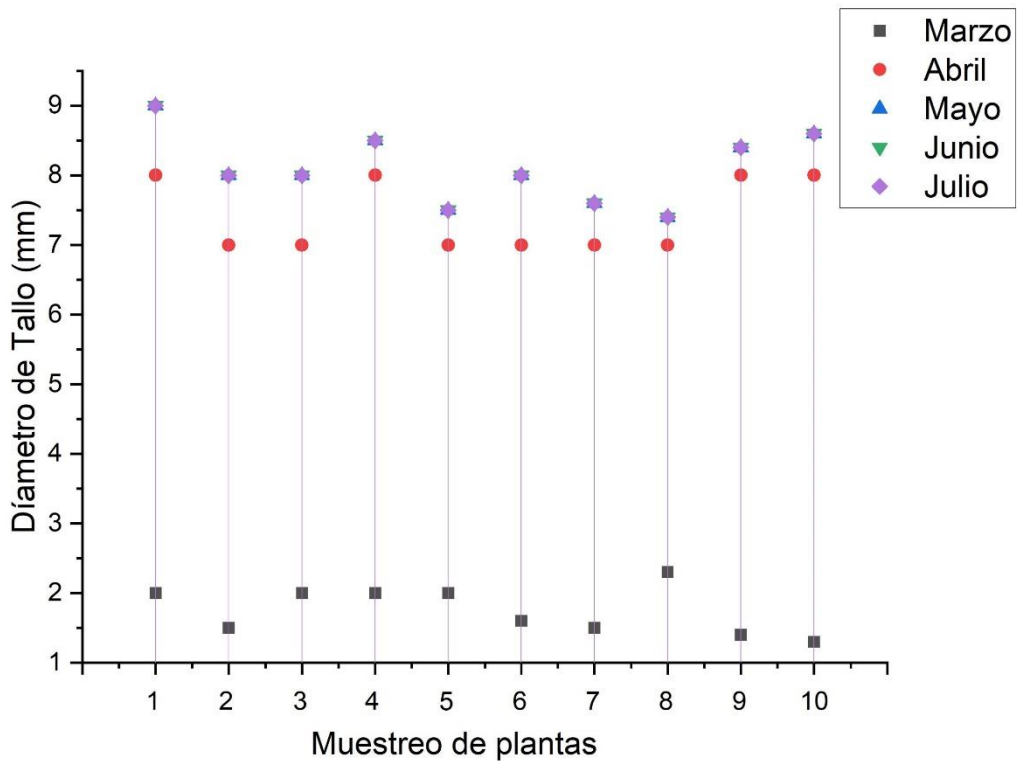
propia genética, aquí se muestran diferencias importantes casi de metro y medio, no obstante, es normal para el tipo de semilla utilizado ya que fueron semillas criollas[41].



**Figura 4.10.** Altura de plantas de pepino durante el desarrollo del cultivo

#### 4.7.2 Diámetro de tallo

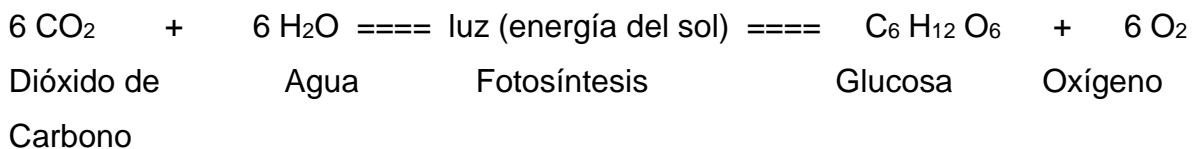
El diámetro del tallo está íntimamente relacionado con los frutos, la planta va fortaleciendo su tallo para el crecimiento, desarrollo y fructificación. Entre marzo y abril es donde se observa en la Figura 4.11 el incremento en el diámetro del tallo de la planta ya que se está preparando para el transporte nutrimental y de carbohidratos para el llenado de frutos. En el mes de junio se observa que el crecimiento del tallo fue imperceptible ya que la planta ya había alcanzado el desarrollo de su tallo para la alimentación de sus frutos[42].



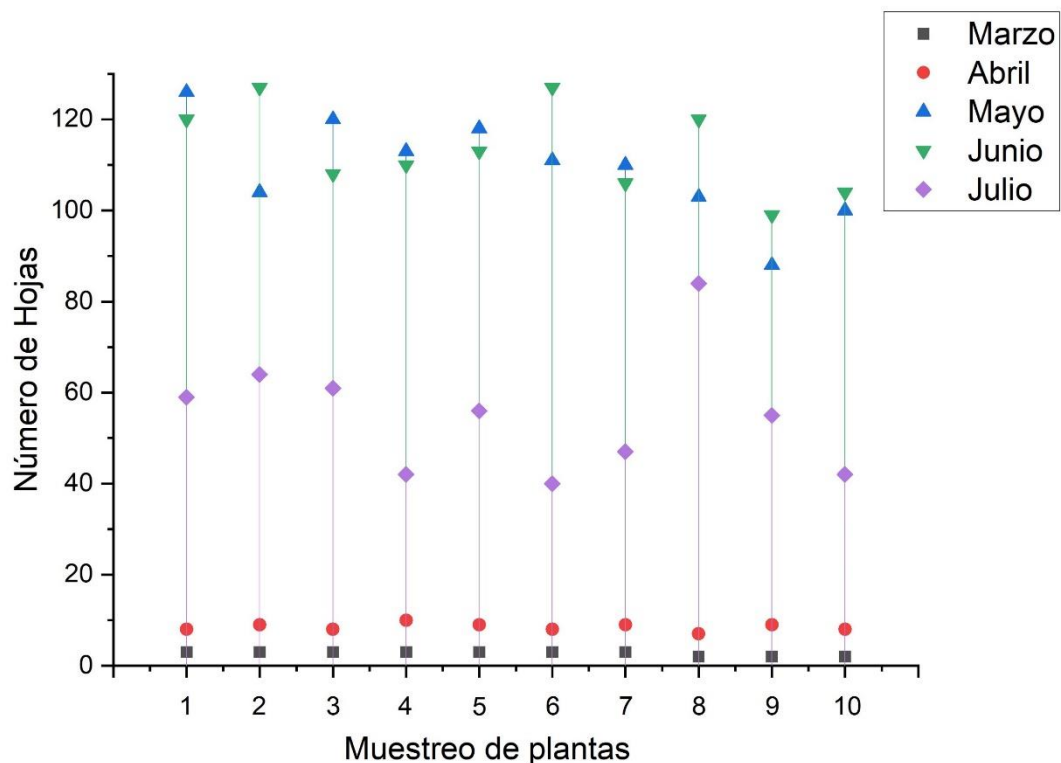
**Figura 4.11.** Comportamiento del diámetro de tallo

#### 4.7.3 Número de hojas

En las hojas verdes, se lleva a cabo la fotosíntesis en presencia de CO<sub>2</sub>, agua y energía solar, son estas la fábrica de alimentos, ahí se generan los fotosintatos (carbohidratos) más elementales y la planta los manda a los frutos, o bien a donde se presente una demanda metabólica.



En la Figura 4.12, se observa que después de la siembra del pepino en el mes de marzo y a los 5 días inicia la germinación, aparecen primero las hojas cotiledonares, luego a los 15 días aparece la primera hoja verdadera. Es a partir de esta hoja que se inicia el conteo ya que es en las hojas verdaderas donde se lleva a cabo la Fotosíntesis. En la última semana de abril se cuantifican algunas hojas verdaderas, pero es durante el mes de mayo cuando se incrementó de manera significativa el número de hojas para abastecer a los frutos en su crecimiento. Durante los meses de junio y julio se estabiliza el número de hojas y su crecimiento se empieza a detener[43].



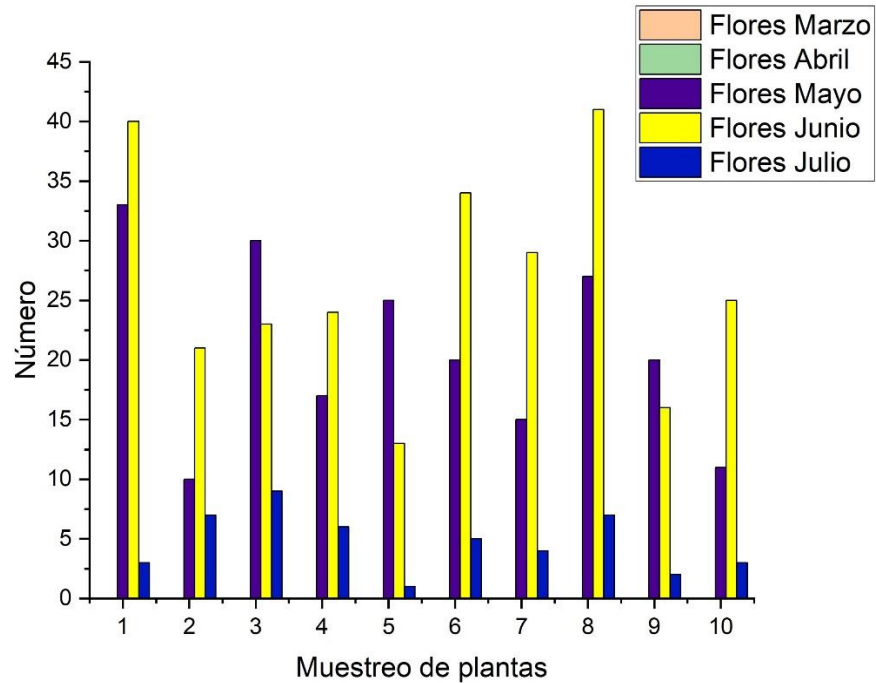
**Figura 4.12.** Comportamiento del crecimiento de número de hojas.

La alta temperatura ocurrida en los meses de mayo y junio, asociada con la presencia de una alta humedad relativa ocasionada por las lluvias, propicio las condiciones para la presencia de la enfermedad de las hojas conocida como cenicilla. Ésta fue controlada rápidamente con un agroquímico (Trimet) derivado del cobre.

#### 4.7.4 Número de flores y polinización.

Son las flores de una planta, las responsables de la conservación de la especie y la obtención de frutos en la mayoría de las especies vegetales. En el caso del cultivo del pepino establecido, es una especie dioica que requiere de los insectos o de la mano del hombre para su polinización, cuando se establecen dentro de un invernadero. De cada flor femenina se obtendrá un fruto, pero existen factores como las altas temperaturas en el invernadero, la falta de viento para mover las plantas de manera natural o deficiencias de humedad, las que favorecen el aborto de las flores y se pierden los frutos.

En la Figura 4.13, se observa que en los meses de mayo y junio ocurrió el mayor número de flores en las plantas, esto ocurre debido a que fueron ambos meses cuando la planta estaba en su máximo desarrollo. Destacan dos plantas particularmente la uno y la ocho con cerca de 45 flores y un promedio de 25 flores por planta. Lo anterior muestra que de ser polinizadas todas, sería imposible que la planta pudiera abastecer la demanda de hidratos de carbono para llenar el fruto y entonces ocurre un aborto natural[44].



**Figura 4.13.** Comportamiento del número de flores.

En las diferentes etapas de desarrollo del cultivo de pepino, se estuvieron realizando acciones para favorecer la polinización, moviendo los alambres que sostenían a las plantas. Esta acción no se puede evaluar, dado que no se tiene control sobre ella. Aun así, se llevó a cabo cada vez que se podía realizar (Figura 4.14). Para futuros trabajos de investigación es conveniente establecer plantas partenocárpicas que son híbridos para producir sin necesidad de polinización [45].

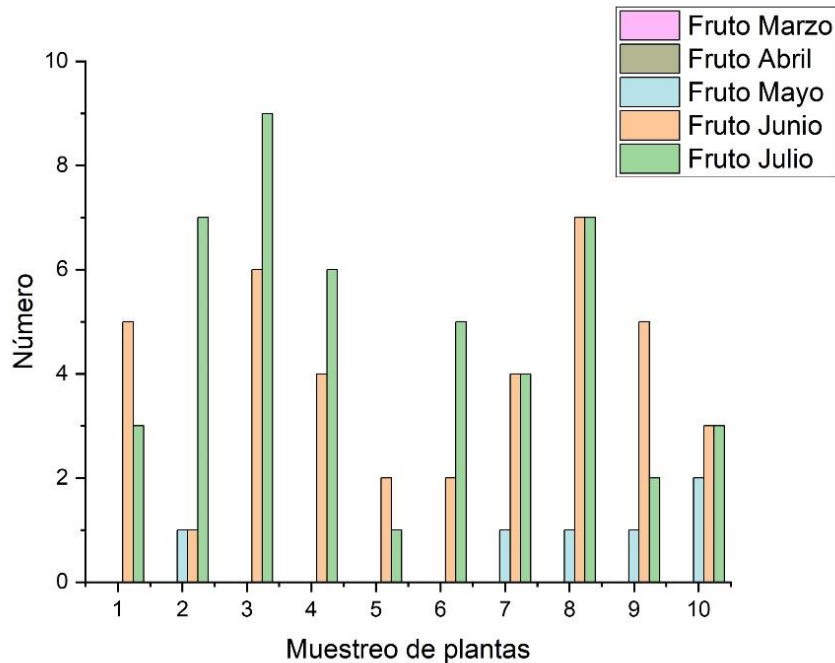


**Figura 4.14.** Polinización manual de las plantas de pepino en invernadero

#### 4.7.5 Número de frutos por planta.

Conforme se incrementaba la temperatura del invernadero a partir de abril (Figura 4.2), se observa que el número de flores también se incrementó, pero la falta de una polinización oportuna y las altas temperaturas de los meses de mayo y junio favorecieron que no todas las flores fueran polinizadas y ocurría el aborto de frutos. Más aún, si se considera que las temperaturas por arriba de los 28 °C ocasionan estrés a las plantas.

En la Figura 4.15, se muestra los datos relacionados con el comportamiento del número de frutos por planta. Se aprecia que excepto en marzo, en el resto de los meses las temperaturas medias máximas durante el periodo más caliente en el invernadero sobrepasaron las temperaturas óptimas de producción. A pesar de que hubo un número importante de frutos pequeños como se ve en las plantas una, tres y ocho, los frutos comerciales alcanzados fueron pocos[46].

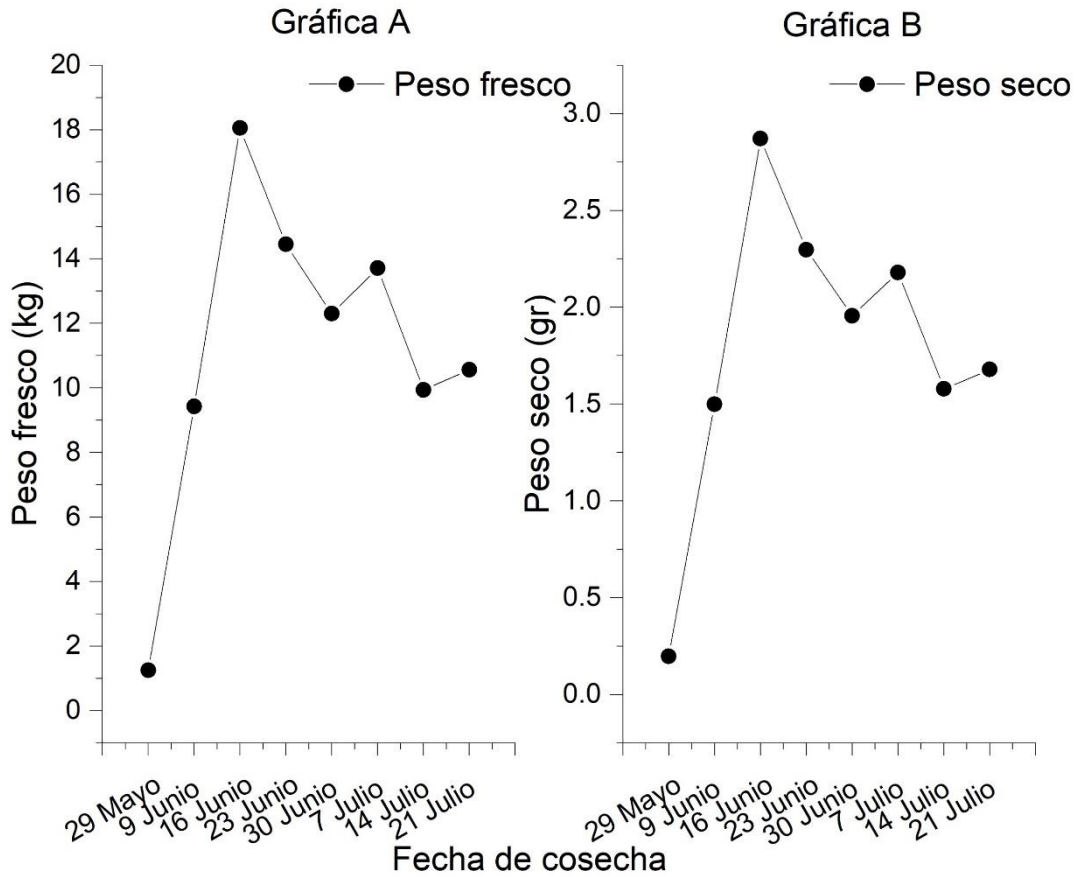


**Figura 4.15.** Comportamiento del número de frutos por planta en el invernadero.

#### 4.7.6 Rendimiento de materia fresca y materia seca.

En la Figura 4.16, se presentan dos gráficas. En la gráfica A, se muestra que se obtuvieron ocho cortes de fruto, en las fechas que se pueden observar y con sus respectivos pesos de fruto en fresco, expresado en kg.

En la misma gráfica A, se muestra el peso obtenido por semana y se tiene que el 16 de junio se tuvo la máxima producción, llegando a los 18 kilos en una población de 87 plantas, teniendo como relación que se empezó a polinizar a finales de mayo. En la Figura 34, se muestran los frutos de algunas plantas, después de la fecha de ese corte se tuvo un decremento natural de rendimiento, cuando la planta inicia su declive.



**Figura 4.16.** Rendimiento de fruto fresco y en materia seca.

En la gráfica B de la Figura 4.16, se muestra el peso de la materia seca del fruto. Después que se tomó una muestra compuesta de frutos y se sometieron a secar en la estufa a una temperatura de 60°C durante 24 hrs. El resultado mostró que solo el 15 % del peso fresco del cultivo del pepino estudiado es materia seca, eso indica que el fruto requiere de mucha agua para su producción. El peso fresco de fruto se multiplicó por el factor 0.15 dando así el resultado de la gráfica B [47].



**Figura 4.17.** Frutos de mayo

#### 4.7.7 Calidad de los frutos

Finalmente, los frutos de pepino obtenidos en cualquier invernadero, es el mercado y este determina la calidad de los frutos que consume. En México la normatividad de la calidad la establece la Norma Mexicana NMX-FF-023-1982 en cuatro categorías con base en su tamaño y se presenta en el Cuadro 2. En México se identifican dos tipos de pepino: europeo y americano. Si bien la Norma Mexicana se aplica a las dos, el primero es más largo y delgado y de un color verde intenso. En cambio, el segundo tiene mayor grosor y menor longitud. Es en esta categoría en que fue clasificado el pepino de este trabajo. Otros investigadores mencionan que los tipos más comunes de pepino son: americano, europeo, del este medio, holandés, y oriental [48].

**Tabla 3.** Calidad de frutos de pepino.

Letra de referencia	Tamaño	
	Grosor cm	Longitud cm
A	Menor de 3.5	Menor de 14.0
B	3.5 – 5.0	14.0 – 16.5
C	5.1 – 6.5	14.0 – 16.5
D	mayor de 6.5	mayor de 16.5

Fuente: NMX-FF-023-1982

**Tabla 4.** Categoría predominante de frutos por corte.

Fecha	Categoría predominante	Número de frutos	Peso de frutos (kg)
29-may	C	6	0.756
09-jun	B	30	7.954
16-jun	D	42	15.630
23-jun	B	29	11.488
30-jun	C	24	9.279
07-jul	C	31	10.876
14-jul	B	39	7.109
21-jul	A	48	8.902
	<b>Total</b>	249	71.994

Al hacer la comparación entre las Tablas 3 y 4, se observó tanto su diámetro como la longitud del fruto corresponden al rango que se menciona en la norma mexicana del pepino, en este caso en su mayoría corresponde al tipo B. Se tuvo un total de 71.994 kilos de pepinos por las 87 plantas durante todo el cultivo. Es decir 0.82 kg por planta.

En el Tabla 5, se tomó en cuenta la clase que predominó más en la fecha de corte mencionada, como ejemplo más detallado se tiene la fecha de corte del 16 de junio. Se observa que en este corte predominaron los frutos grandes con grosor mayor de 6.5 cm y una longitud mayor de 16.5 cm.

**Tabla 5.** Categorías del corte 16 de junio.

<b>Categoría</b>	<b>Número de frutos</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>A</b>	13	0.418
<b>B</b>	26	1.375
<b>C</b>	5	0.640
<b>D</b>	45	15.630
<b>Total de este corte</b>	89	18.063

## **V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Con relación a los objetivos establecidos en este trabajo de investigación, se puede concluir que se lograron, ya que fue posible construir un equipo de bajo costo, para el seguimiento, registro, almacenamiento y exportación de variables agroclimáticas que afectan el desarrollo de un cultivo producido en invernaderos de media y baja tecnología.

Se logró demostrar que, mediante el equipo diseñado y la creación de un software específico, fue posible obtener la información necesaria para interpretar las variables fisiológicas que ocurrieron en el cultivo de pepino expuestas a distintas variables agroclimáticas.

De las variables agroclimáticas registradas, fueron la temperatura y la humedad relativa las que tuvieron el mayor efecto sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de pepino.

Se recomienda que al realizar trabajos de investigación similares que contemplen alternativas para el seguimiento de variables agroclimáticas en invernadero, se lleve a cabo un mayor control sobre la temperatura óptima y la humedad relativa de un cultivo.

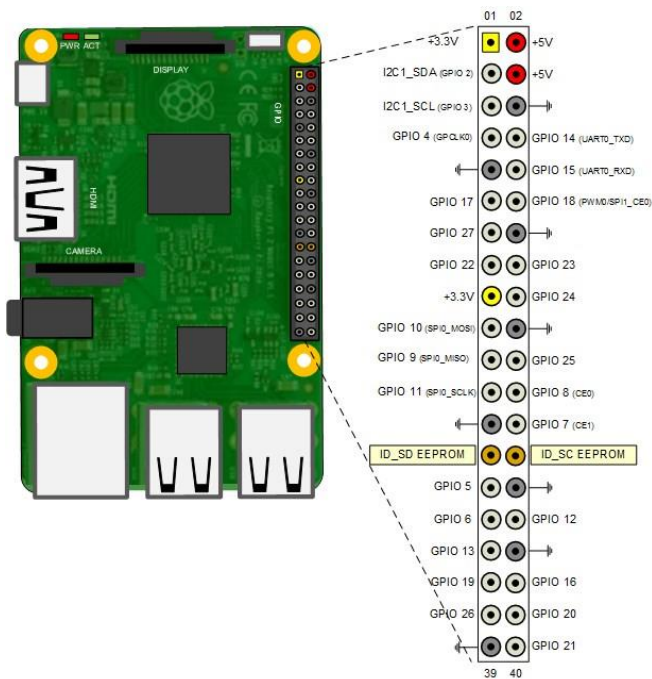
Así mismo, resulta necesario el establecimiento de materiales genéticos partenocárpicos (pepino - híbrido) que no requieran de una polinización manual y que la humedad del sustrato se mantenga mediante la automatización de un riego por goteo.

En cuanto sea posible como recomendación, evaluar la precisión del equipo y ponerlo en invernaderos comerciales en colaboración con los productores.

## VI.- ANEXOS

### A. Raspberry pi 3b+ características

Es una computadora de placa reducida) de bajo costo. Ya que esta se quedará fija dentro del invernadero.



**Figura 6.1.** Datasheet de la tarjeta Raspberry

El Raspberry Pi 3B+ es la tercera generación de Raspberry Pi, salió al mercado para reemplazar al modelo 2B en febrero del 2016. Se recomienda el uso del modelo 3B en escuelas ya que ofrece un mejor rendimiento a las versiones anteriores. El modelo A+ se recomienda para aplicaciones embebidas, donde se necesite un consumo menor de energía y un tamaño más compacto.

\*Nota: Solamente incluye la placa. No incluye carcasa, cable de alimentación USB a microUSB, cable HDMI ni tarjeta MicroSD necesarias para su puesta en marcha. Raspberry Pi necesitan un sistema operativo insertado en una tarjeta MicroSD para poder funcionar. El Sistema operativo es gratuito y Open Source.

Mejoras

- Procesador ARMv8 Cortex-A53 64-bit Quad-Core @ 1.2GHz (50% más rápido que el modelo 2B)
- 1GB RAM
- Wifi integrado 802.11 b/g/n
- Bluetooth 4.1 y BLE

#### Especificaciones técnicas

- SoC: Broadcom BCM2387 (CPU, GPU, DSP y SDRAM)
- Juego de instrucciones: RISC de 64 bits
- CPU: 1.2GHz Quad-core ARM Cortex-A53 (ARMv8 instruction set)
- GPU Broadcom VideoCore IV @ 400MHz
- Memoria RAM 1GB LPDDR2 (compartidos con la GPU)
- Conexiones
  - 4 x USB 2.0
  - 1 x Salida audio mini jack 3.5 mm
  - 1 x Salida audio/vídeo HDMI
  - 1 x Micro USB (Alimentación)
  - 1 x RJ45 10/100 Ethernet
- Wifi integrado 802.11 b/g/n
- Bluetooth 4.1 y BLE
- Interfaz para Cámara (CSI)
- Interfaz para Display (DSI)
- Slot para tarjeta Micro SD
- Jack 3.5mm para Audio y Vídeo compuesto
- Alimentación: 5V/2.5 A (3.5 W) via micro-USB
- Dimensiones: 85.6 mm x 56.5 mm
- Peso: 45g

## B. Pantalla 3.5 pulgadas LCD para Raspberry

La placa utiliza la interfaz SPI de alta velocidad en el Raspberry Pi. Puede usar esta mini pantalla como una consola, puerto de ventanas X, mostrar imágenes o vídeo, etc. Está diseñado para encajar perfectamente en el Modelo A+ o B+ o Raspberry Pi 2.

Utiliza los pines SPI de hardware (SCK, MOSI, MISO, CE0, CE1), así como GPIO #25 y #24. El pin GPIO #18 puede ser usado como PWM para controlar la luz de fondo un poco. Todos los demás GPIO no han sido utilizados.

### Características

- Diseñado para Raspberry Pi, una solución alternativa si no se tiene un monitor HDMI.
- Soporta cualquier versión de Raspberry PI
- 320 x 480 de resolución, lo que proporciona una mejor visualización.
- Soporta sistema Raspbian, lo que permite soportar:
- Vídeos Play (soporta formatos múltiples, MP4 y así sucesivamente)
- Teclado software Support (interacción del sistema sin teclado / ratón)



**Figura 6.2.** Pantalla LCD 3.5 pulgadas para Raspberry pi 3b+

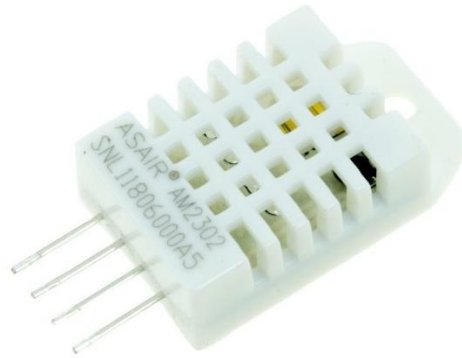
### C. Arduino

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables dupont)[49].

El software de Arduino está compuesto por un conjunto de herramientas de programación, utiliza un lenguaje básico como es el de C ++. Una de sus principales características del software y del lenguaje de programación es lo fácil de poder usarse. Al ser software libre, da acceso a que cualquier persona interesada pueda crear aplicaciones para las placas, modificar y utilizar los códigos. La plataforma Arduino fue creada por estudiantes, en el instituto de Diseño de Interacción Ivrea, para que los estudiantes que no tuvieran suficiente experiencia en electrónica y programación pudieran crear prototipos de forma fácil y rápida. Se logro que hubiera una alternativa más económica para poder adquirir tarjetas electrónicas[50].

### D. DHT22 (sensor de temperatura y humedad relativa)

El DHT22 (AM2302) es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de buen rendimiento y bajo costo. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y más[51].



**Figura 6.3.** Sensor DHT22 de Temperatura y Humedad

El DHT22 presenta mejores prestaciones respecto al sensor DHT11, como mejor resolución, mayor precisión y un empaque más robusto.

#### Especificaciones técnicas

- Voltaje de Operación: 3V - 6V DC
- Rango de medición de temperatura: -40°C a 80 °C
- Precisión de medición de temperatura:  $<\pm 0.5$  °C
- Resolución Temperatura: 0.1°C
- Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH
- Precisión de medición de humedad: 2% RH
- Resolución Humedad: 0.1%RH
- Tiempo de censado: 2s
- Interface digital: Single-bus (bidireccional)
- Modelo: AM2302
- Dimensiones: 20\*15\*8 mm
- Peso: 3 gr.
- Carcasa de plástico blanco

#### Pines

- 1- Alimentación: +5V (VCC)

- 2- Datos (DATA)
- 3- No Usado (NC)
- 4- Tierra (GND)

#### E. Sensor de humedad de suelo

El Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2 permite medir la humedad en el suelo utilizando el principio de capacitancia entre electrodos en lugar de resistencia, lo que aumenta considerablemente la vida útil del sensor. El electrodo posee una capa de protección anticorrosión para una mayor duración (no se oxida como el sensor resistivo). Compatible con Arduino, PIC, ESP8266/NodeMCU/NodeMCU-32. El sensor es ideal para monitorear el nivel de humedad de tus plantas y así recordar cuando necesitan ser regadas o incluso para realizar un sistema totalmente automatizado de riego añadiendo una válvula o una bomba de agua. Si el sistema se conecta a Internet podríamos controlar/monitorear nuestro jardín desde cualquier lugar del mundo!

El funcionamiento del sensor se basa en medir la capacitancia entre 2 electrodos insertados dentro del suelo, la capacitancia entre los electrodos dependerá de la humedad del suelo, por lo que para un suelo muy húmedo tendremos una capacitancia muy baja y para un suelo muy seco la capacitancia será muy alta. El electrodo va conectado a una tarjeta de acondicionamiento que entrega una salida analógica. La salida analógica (AO) entrega un voltaje analógico desde 0V para un suelo muy húmedo hasta 5V para un suelo muy seco. Para la conexión a Arduino debemos conectar la salida analógica del módulo a una entrada analógica del Arduino[52].

Recomendaciones: Introducir en la tierra solo la parte de los electrodos, los circuitos deben ser protegidos de la humedad. Para uso del sensor del Raspberry Pi recomendamos utilizar un ADC como el Módulo ADC ADS1115. Para añadir una capa protectora al sensor se puede utilizar una laca o barniz epóxico.

Nota: La salida del sensor es de tipo cualitativo más que de tipo cuantitativo.

#### Especificaciones técnicas

- Voltaje de alimentación: 3.3V - 5V DC
- Corriente operación: 5mA
- Voltaje de la señal de salida: 0 a 5V (Analógico)
- Modelo: capacitive soil moisture sensor v1.2
- Vida útil: 3 años mín.
- Conector: PH2.0-3P
- Incluye: Electrodo y cable jumper hembra
- Dimensiones: 98\*23 mm
- Peso: 15 gramos

#### Conexiones

- GND: Tierra (GND 0V)
- VCC: Voltaje de alimentación (3.3V - 5V DC)
- AOUT: Salida analógica

#### F. Sensor de intensidad luminosa

El módulo BH1750 es un sensor de iluminación digital para medición de flujo luminoso (iluminancia) de la empresa Rohm Semiconductor. Posee un conversor interno de 16-bit, por lo que entrega una salida digital en formato I2C. Su desempeño es mejor al de un Foto-Resistor (LDR), pues no es necesario realizar conversiones de voltaje para obtener datos interpretables.

El BH1750 entrega la intensidad luminosa directamente en unidades Lux (Lx). El lux es la unidad derivada del S.I. de Unidades para la iluminancia o nivel de iluminación.

Equivale a un lumen /m<sup>2</sup>. Se usa en la fotometría como medida de la luminancia, tomando en cuenta las diferentes longitudes de onda según la función de luminosidad, un modelo estándar de la sensibilidad a la luz del ojo humano[53].

Ejemplos de iluminación (Lux):

- Noche: 0.001-0.02
- Luz de medianoche: 0.02-0.3
- Interior nublado: 5-50
- Exterior nublado: 50-500
- Soleado Interior: 100-1000
- Bajo el sol de verano: alrededor de 10<sup>6</sup>
- Recomendado para lectura de libros: 50-60;
- Estándar de video casero: 1400.

Especificaciones técnicas

- Voltaje de Operación: 3V – 5V
- Interfaz digital a través de bus I2C con capacidad de seleccionar entre 2 direcciones
- Respuesta espectral similar a la del ojo humano
- Realiza mediciones de iluminancia y convierte el resultado a una palabra digital
- Amplio rango de medición 1-65535 lux
- Modo de bajo consumo de energía
- Rechazo de ruido a 50/60 Hz
- Baja dependencia de la medición contra la fuente de luz: halógeno, led, incandescente, luz de día, etc.

## G. Sensor de CO<sub>2</sub>

El sensor MH-Z19 mide la concentración de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en el aire. Posee un rango de 0 a 5000ppm, compensación por temperatura y la medición es independiente del nivel de oxígeno. Posee dos tipos de salida: UART y PWM.

A diferencia de los sensores de gas MQ que utilizan la variación de una resistencia dependiendo del gas (electroquímicos), el sensor MH-Z19 utiliza un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR). Dentro del sensor se encuentra una pequeña cámara donde el gas es sometido a luz infrarroja, el gas CO<sub>2</sub> absorbe determinada longitud de onda en el haz de luz IR de acuerdo a la concentración de gas y el sensor mide la diferencia dentro de esta longitud de onda, entregando la concentración de CO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm).

### Especificaciones técnicas

- Voltaje de Operación: 3.6 - 5.5V DC
- Voltaje de interfaz: 3.3V
- Consumo de corriente: <18 mA
- Interfaz: UART, PWM
- Rango de medición: 0-5000ppm
- Precisión: 5% (50ppm)
- Principio: NDIR
- Tiempo de precalentamiento: 3min
- Temperatura de trabajo: 0-50°C
- Humedad de trabajo: 0-95% HR
- Dimensiones: 33\*20\*9mm
- Peso: 21g
- Vida útil: 5 años

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] P. N. Sandoval Vizuite, "Tecnología y desarrollo : Electrónica digital," vol. 4, pp. 341–351, 2018. ISSN: 2477-8818 (último acceso Feb. 22, 2021)
- [2] A. M. Villate Mora, "Actualidad y la electrónica," *Ing. e Investig.*, p. 27, 1992. ISSN: 2248-8723 (último acceso Jun. 20, 2021)
- [3] D. Beltrán, "Automatización en la Agricultura: un caso de aplicación artificial , control de calidad en semilleros," no. September, pp. 1–7, 2014, doi: 10.13140/2.1.1299.3922.
- [4] S. Hemming, "Novedades tecnológicas en invernaderos y fábricas de plantas - Redagícola Chile." <https://www.redagricola.com/cl/novedades-tecnologicas-en-invernaderos-y-fabricas-de-plantas/> (último acceso: Jun. 23, 2021).
- [5] J. Velasco Cruz, "El avance de la automatización en la agricultura," 2017. <https://www.redagricola.com/cl/el-avance-de-la-automatizacion-en-la-agricultura/> (último acceso Abr. 25, 2021).
- [6] N. Unidas and M. Regiones, "Fondo de Población de naciones Unidas," 2021 (último acceso: Ene 5, 2021).
- [7] SMEAP, "Consideraciones de la Agricultura Protegida en América Latina." <https://smeapmexico.org/consideraciones-de-la-agricultura-protegida-en-america-latina/> (último acceso Jun. 23, 2021).
- [8] A. Sosa Baldivia and G. Ruíz Ibarra, "La disponibilidad de alimentos en México: un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050," *Papeles de Población*, vol. 23, no. 93, pp. 207–230, Jul. 2017, doi: 10.22185/24487147.2017.93.027. ISSN: 2448-7147. (último acceso Ene. 3, 2021).
- [9] Palacio Legislativo de San Lázaro, "El cambio climático y el sector agropecuario en México," 2019. (último acceso Ene. 6, 2022).

- [10] M. Mamani, M. Villalobos, and R. Herrera, "Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 25, no. 4, pp. 599–618, Dec. 2017, doi: 10.4067/S0718-33052017000400599. ISSN: 0718- 3305. (último acceso Nov. 26, 2021).
- [11] R. de Gortari Rabiela, "Xochimilco como alternativa de competitividad para los orgánicos: el caso de Invernaderos Tepexomulco," *Nueva Antropol.*, vol. 25, no. 77, pp. 59–78, 2012, (último acceso. Nov. 27, 2020). [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-06362012000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-06362012000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- [12] J. L. Hernández Pérez, "Desarrollo tecnológico e integración comercial de los productores agrícolas de la Costa de Hermosillo en la globalización," *región y Soc.*, vol. 31, Jan. 2019, doi: 10.22198/rys2019/31/1006. ISSN: 2448-4849, (último acceso. Ene. 8, 2021)
- [13] J. Negrete, *Introduccion al estudio de mecatrónica agrícola*. 2018. ISBN: 978-3-659-03807-5, (último acceso. Ene. 9, 2022). Available: 323069339\_INTRODUCCION\_al\_ESTUDIO\_de\_MECATRONICA\_AGRICOLA
- [14] Ó. A. Orozco and G. Llano Ramírez, "Sistemas de Información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 15, no. 28, pp. 103–124, 2016, doi: 10.22395/rium.v15n28a6. ISSN: 1692-3324, (último acceso. Ago. 18, 2021)
- [15] A. Pardo García and L. Castellanos González, "Automatización de ambientes en invernaderos simulando escenarios futuros," *Rev. Colomb. Technol. Av.*, vol. 1, no. 29, May 2017, doi: 10.24054/16927257.v29.n29.2017.2497. ISSN: 1692-7257, (último acceso. Ene. 8, 2022)
- [16] Agencia Europea del medio ambiente, "La agricultura y el cambio climático," p. 9, 2015, [Online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales->

2015/articulos/la-agricultura-y-el-cambio-climatico. ISBN: 9788469475195, (último acceso. Nov. 26, 2021)

- [17] J. Flores Velazquez, "Optimiza el invernadero con la automatización," *Hortalizas*, 2016. <https://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/optimiza-el-invernadero-con-la-automatizacion-parte-12/>. (último acceso. Oct. 14, 2021)
- [18] D. Zizumbo Villreal and P. C. Garcia Marin, "El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica," *Rev. Geogr. Agrícola*, no. 41, pp. 85–113, 2008. ISSN: 0186-4394, (último acceso. Jun. 26, 2021).
- [19] E. Hernández Xolocotzi, "La agricultura tradicional en México," *Comer. Exter.*, vol. 38, no. 8, pp. 673–678, 1988. (último acceso. Oct. 14, 2021).
- [20] A. M. López Araiza, "Materiales plásticos para uso agrícola.," Centro de investigación de química aplicada, 2004. ISBN: 9788469475195. (último acceso. Oct. 21, 2021).
- [21] A. Moreno Reséndez, J. A. Durón, and A. Luévano González, "Characteristics of protected agriculture and their environment in Mexico," *Rev. Mex. Agronegocios*, vol. 29, pp. 763–774, 2011, ISBN: 9706285938, (último acceso. Jun. 6, 2021). [Online]. Available: <https://ageconsearch.umn.edu/record/114479/files/12.Alex.NarroRev.pdf>.
- [22] M. A. García, S. ; Gutiérrez, H. C. ; López, S. Y. Rivera, and A. C. Ruiz, "Estado del arte de la tecnología de robots aplicada a invernaderos State of the art of robot technology applied to greenhouses," *Rev. AIA*, vol. 11, no. 3, pp. 41–52, 2007, ISSN: 0188-7890, (último acceso: Jun, 25, 2021). [Online]. Available: <http://content.ebscohost.com/ContentServer.asp?T=P&P=AN&K=31189161&S=R&D=bth&EbscoContent=dGJyMNLe80Seqa44y9fwOLCmr0%2Bep7VSsq24SLGWxWXS&ContentCustomer=dGJyMOzpsEqyr7NIuePfgex44Dt6fIA>.
- [23] F. Carrasco Choque, "Effects of climate change in production and performance in Quinoa Juli District, period 1997 – 2014," vol. 4, no. 4, 2016. ISSN: 2219-

7168. (último acceso: Nov, 26, 2020).

- [24] F. Hernández Padilla, "Deposito para cultivo de hidroponia," Universidad Autonoma de México, 2006. (último acceso: Oct, 1, 2021) Available: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/331267>
- [25] INTAGRI, "La Industria de los Cultivos Hidropónicos ," *Ser. Horitucultura Protegida*, 2017, [Online]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-industria-de-los-cultivos-hidroponicos>. (último acceso: Oct, 3, 2021).
- [26] S. K. Deepa, H. P. Hadimani, C. N. Hanchinamani, R. Shet, S. Koulgi, and A. Ok, "Studies on Character Association in Cucumber (*Cucumis sativus* L.)," *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 11, pp. 1977–1982, Nov. 2018, doi: 10.20546/ijcmas.2018.711.224. ISSN: 2319-7692. (último acceso: Ene, 7, 2022).
- [27] M. Pino, "El cultivo del pepino (*Cucumis satuvus* L.)," *Contacto Rural*, vol. 3, pp. 10–11, 2013, ISSN: 1853-4252, (último acceso: Oct, 2, 2021). [Online]. Available: [http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1315/EL\\_CULTIVO\\_DEL\\_PEPINO %28Cucumis satuvus L.%29..pdf?sequence=1](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1315/EL_CULTIVO_DEL_PEPINO_%28Cucumis%20satuvus%20L.%29..pdf?sequence=1).
- [28] Procuraduría Federal del Consumidor, "Pepino, fresco y saludable," 2020. (último acceso: Oct, 1, 2021). [Online]. Available: <https://www.gob.mx/profeco/documentos/pepino-fresco-y-saludable?state=published#:~:text=De acuerdo con información del,de 803 mil 706 toneladas.&text=De las entidades que cosechan,enero y mayo%2C según SIAP>.
- [29] A. Solis Valencia, "'Horticultura Avanzada' Diaporama: Producción de pepino en hidroponia," 2017. (último acceso: Oct, 2, 2021). [Online]. Available: [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70192/secme-11279\\_1.pdf?sequence=1](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70192/secme-11279_1.pdf?sequence=1).
- [30] M. E. Alvarez Sanchez, "Nutrición de cultivos," *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 34, no. 3, 2011, ISSN: 0187-7380, (último acceso: Ene, 6, 2022) [Online]. Available:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802011000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000300004).

- [31] N. D. Torres Zazueta, F. Tafoya Ayala, G. Yáñez Juárez, T. de J. Velázquez Alcaraz, and T. Díaz Valdes, “Calidad de luz en el crecimiento y desarrollo del pepino y sus patógenos.,” 2019. (último acceso: Oct. 1, 2021). [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Correia-Aguiar/publication/333547356\\_HABITAT\\_POTENCIAL\\_DEL\\_MARLIN\\_NEGRO\\_Istiompax\\_indica\\_CUVIER\\_1832\\_EN\\_EL\\_PACIFICO\\_ORIENTAL\\_REPCA\\_9\\_Memoria/links/5cf2da7f4585153c3dab66ba/HABITAT-POTENCIAL-DEL-MARLIN-NEGRO-Isti](https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Correia-Aguiar/publication/333547356_HABITAT_POTENCIAL_DEL_MARLIN_NEGRO_Istiompax_indica_CUVIER_1832_EN_EL_PACIFICO_ORIENTAL_REPCA_9_Memoria/links/5cf2da7f4585153c3dab66ba/HABITAT-POTENCIAL-DEL-MARLIN-NEGRO-Isti).
- [32] M. García García, A. L. Ríos Osorio, and J. Álvarez del Castillo, “La polinización en los sistemas de producción agrícola : revisión sistemática de la literatura.,” *IDESIA (Chile)*, vol. 34, no. 3, pp. 53–68, 2016, ISSN: 0718-3429, (último acceso: Ene. 13, 2022) [Online]. Available: <http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v34n3/art08.pdf>.
- [33] A. Benavides Mendoza, “La importancia de la temperatura en la productividad de hortalizas en invernadero,” Saltillo, Coah., pp. 01–17, 2011. (último acceso: Ene. 5, 2022). [Online]. Available: <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r116892.PDF>.
- [34] J. Doria, “Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento,” *Cultiv. Trop.*, vol. 31, no. 1, pp. 00–00, 2010. ISSN: 0258-5936, (último acceso: Ene, 6, 2022).
- [35] C. García, G. Danilo, S. O. N. G, and E. P. Nacional, “Control de luz y temperatura de un invernadero,” *Control*, vol. 19, no. May 2014, pp. 47–52, 2005, (último acceso: Ene, 4, 2022). [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/27557509\\_Control\\_de\\_luz\\_y\\_temperatura\\_de\\_un\\_invernadero](https://www.researchgate.net/publication/27557509_Control_de_luz_y_temperatura_de_un_invernadero).
- [36] A. A. Steiner, “The universal nutrient solution.,” *Sixth Int. Congr. Soil. Cult.*, no. Society for Soilless Culture, pp. 633-650., 1984. (último acceso: Ene, 17, 2022)

- [37] A. Moreno-Reséndez, N. Rodríguez-Dimas, J. L. Reyes-Carrillo, C. Márquez-Quiroz, M. R. Moncayo-Luján, and L. Salas-Pérez, "Importancia del agua y potencial del vermicompost en la retención de humedad del sustrato para la actividad agrícola," *Agric. Orgánica*, vol. 6, no. November, pp. 1–19, 2013.
- [38] M. Astiz, J. Del Castillo, P. Muñoz, R. Savé, and X. Aranda, "Fertilización carbónica Cultivo de tomate en hidroponía," 2010. ISBN: 9706285938, (último acceso: Jun. 23, 2021). [Online]. Available: <https://www.navarraagraria.com/categories/item/282-fertilizacion-carbonica-cultivo-de-tomate-en-hidroponia>.
- [39] R. Barraqueta, "Implementación de invernadero con sistema de control y monitoreo inalámbricos 424.16.9," p. 197, 2016, (último acceso: Oct. 2, 2021). [Online]. Available: <https://zagan.unizar.es/record/58019/files/TAZ-TFG-2016-4838.pdf>.
- [40] Vaisala, "Las mediciones climáticas en los invernaderos garantizan un óptimo crecimiento de las plantas," *Vaisala*, pp. 1–2, 2013, (último acceso: Oct. 7, 2021). [Online]. Available: <http://es.vaisala.com/Vaisala Documents/Application notes/CEN-BAU-Greenhouse-Climate-Application-Note-B211142ES-A.pdf>.
- [41] J. O. Cereceres, F. S. del Castillo, M. del C. Mendoza Castillo, and A. T. García, "Desirable traits for cucumber plants grown under greenhouse and hydroponics at high plant densities," *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 32, no. 4, pp. 289–294, 2009, doi: 10.35196/rfm.2009.4.289-294. ISBN: 9706285938, (último acceso: Ene. 17, 2022).
- [42] K. Chacón-Padilla and J. E. Monge-Pérez, "Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: comparación entre tipos de pepino," *Rev. Tecnol. en Marcha*, Feb. 2020, doi: 10.18845/tm.v33i1.5018. ISSN: 2215-3241, (último acceso: Ene. 17, 2022).
- [43] E. Zamora, "EL cultivo de pepino europeo (*Cucumis sativus* L.) bajo cubiertas plásticas," *Univ. Son.*, pp. 1–8, 2017, (último acceso: Ene. 6, 2022).

- [Online]. Available: <http://www.dagus.uson.mx/Zamora/6>. EL CULTIVO DE PEPINO EUROPEO (Cucumis sativus L.) BAJO CUBIERTAS PLASTICAS.pdf.
- [44] L. G. González Gómez, M. C. Jiménez Arteaga, D. Castillo Cruz, I. Paz Martínez, A. Y. Cambara Rodríguez, and A. Falcón Rodríguez, “Respuesta agronómica del pepino a la aplicación de QuitoMax en condiciones de organoponía,” *Cent. Agrícola*, vol. 45, no. 3, pp. 27–31, 2018. ISSN: 2072-2001, (último acceso: Ene. 17, 2022).
- [45] K. Chacón, “Caracterización agronómica se 15 genotipos de pepino partenocárpico cultivados bajo ambiente protegido en Alajuela, Costa Rica,” 2015. (último acceso: Ene. 15, 2022). [Online]. Available: [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6483/caracterizacion\\_15\\_genotipos\\_pepino\\_partenocarpico.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6483/caracterizacion_15_genotipos_pepino_partenocarpico.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [46] D. Moreno-Velázquez, B. N. Hernández-Hernández, J. M. Barrios-Díaz, A. Ibáñez-Martínez, W. Cruz-Romero, and R. Berdeja-Arbeu, “Calidad poscosecha de frutos de pepino cultivados con diferente solución nutritiva” *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 6, no. 3, pp. 637–643, 2015. (último acceso: Ene. 17, 2022).
- [47] F. V. Barraza Alvarez, “Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (Cucumis sativus L.) en invernadero,” *Temas Agrar.*, vol. 17, no. 2, pp. 18–29, Jul. 2012, doi: 10.21897/rta.v17i2.699. ISSN: 2389-9182, (último acceso: Ene. 12, 2022).
- [48] J. López-Elias, S. Garza Ortega, M. A. Huez López, J. Jiménez León, E. O. Rueda Puente, and B. Murillo Amador, “Producción de pepino (Cucumis sativus L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero,” *Eur. Sci. J.*, vol. 11, no. 24, pp. 25–36, 2015. ISSN: 1857-7431, (último acceso: Ene. 9, 2022). [Online]. Available: <http://www.agricultura.uson.mx/publicaciones/indexadas/ESJ> Vol.11No.24(2015) Articulo.pdf.

- [49] M. Vital Carrillo, "Introducción al Arduino," *Vida científica*, vol. 9, no. 17, pp. 4–7, 2021, (último acceso: Ago. 18, 2021).
- [50] Y. A. Molina, S. A. S. Ramírez, and J. E. G. Morales, "Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto implementando Internet de las cosas Design and Development of a Remote Monitoring," vol. 149, no. 11, pp. 235–247, 2020. ISSN: 1870-4069. (último acceso: Ago. 18, 2021).
- [51] T. Liu, "Digital-Output relative humidity & temperature sensor/module DHT22," 2015. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>. (último acceso: Ago. 15, 2021).
- [52] S. Jimenez, L. Scarioni and K. Vano "Nota Técnica: Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo, fabricados con NaCl, KBr y KCl," *Rev. Ing. UC*, vol. 20, no. 1, pp. 83–86, 2013. ISSN: 1316-6832, (último acceso: Ago. 17, 2021).
- [53] ROHM semiconductor, "Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC," no. 11046, p. 21, 2011, (último acceso: Ago. 15, 2021). [Online]. Available: [www.rohm.com](http://www.rohm.com).